Un Universo en expansión

1

LA CIENCIA PARA TODOS

ASTRONOMÍA

LUIS F. RODRÍGUEZ

Lectulandia

En el principio del tiempo, la gran explosión dio origen al universo: galaxias, estrellas, astros y el propio planeta Tierra; todos ellos son observados ahora por el hombre, quien trata de resolver el misterio de su existencia. Luis Felipe Rodríguez expone en este libro las respuestas que la astronomía ha dado al ser humano acerca del origen, la evolución, la estructura y la composición del universo que habita, y comparte la fascinación que experimenta el astrónomo cuando descubre leyes y medidas en el devenir de la naturaleza sideral. Sin embargo, este conocimiento alcanzado no es un asunto concluido: la ciencia en general, y la astronomía en particular, son (o al menos parecen ser) una búsqueda interminable: cada descubrimiento produce nuevas preguntas y problemas; es decir, el conocimiento humano, como el universo, se encuentra en constante expansión.

Luis Felipe Rodríguez

Un universo en expansión

La ciencia para todos 1

ePub r1.0
griffin 30.03.14

Título original: *Un universo en expansión*
Luis Felipe Rodríguez, 1995
Retoque de portada: Crissmar y NicoleVM

Editor digital: griffin
ePub base r1.0

Prólogo

Yo liberé a los mortales del temor a la muerte, dándoles quiméricas esperanzas.

Del Prometeo de Esquilo

El doctor Luis Felipe Rodríguez, nacido en Mérida, Yucatán, es uno de los más jóvenes y distinguidos astrónomos de habla española. Realizó sus primeros estudios, primaria, secundaria y preparatoria, en su ciudad natal, una de las más bellas y atractivas de la provincia mexicana: la ciudad de las mariposas, por sus miles de veletas que a lo lejos le daban a Mérida un aspecto etéreo y misterioso. Es, además, el centro metropolitano de una de las zonas mexicanas de mayor tradición cultural, tanto indígena como mestiza. Luis Felipe Rodríguez no podría escapar de sus antecedentes mayas; antropológica y astronómicamente hablando: su «destino» era la astronomía.

El doctor Rodríguez hizo sus estudios superiores en la Universidad de Harvard, en donde en 1978 obtuvo el doctorado presentando la tesis *Radio Recombination Line Observations of the Ionized Gas in the Galactic Center*. Esta tesis doctoral fue merecedora, en 1980, del premio «Robert J. Trumpler», que se otorga a la mejor tesis doctoral de astronomía realizada en los Estados Unidos de Norteamérica.

Aunque ya en los años de 1973-1974 trabajó como ayudante de investigador en el Instituto de Astronomía de la UNAM, no fue hasta el año de 1979, después de doctorarse, cuando se le nombró investigador titular de tiempo completo. En 1980, la Junta de Gobierno de la UNAM lo designó director del Instituto de Astronomía. Teníamos y tenemos, como director, al hombre más joven en toda la historia de la astronomía mexicana.

Rodríguez, ahora de 36 años de edad, tiene un *curriculum* y una capacidad de trabajo asombrosos: 35 artículos de investigación, la gran mayoría supervisados y aceptados por árbitros exigentes y publicados tanto en México como en Europa y los Estados Unidos de Norteamérica. Además, varios trabajos de investigación en prensa o en proceso de publicación. Un gran número de trabajos de divulgación científica y/o resúmenes científicos publicados. Continuamente imparte conferencias tanto en el Distrito Federal como en la provincia mexicana o en el extranjero. Participa muy activamente en la formación de nuevos astrónomos y sugiere a sus colegas temas de investigación. Su vigor físico e intelectual es espectacular y, honestamente, envidiable. Sobre todo, es un joven ejemplar y tiene una larga y fructífera vida por delante.

Muy recientemente se le otorgó el premio «Henri Chrétien 1984» por trabajos en astronomía observacional, que se concede a través de la American Astronomical Society.

El presente libro de divulgación, *Un universo en expansión*, representa un intento serio para informar al público de habla española sobre algunos aspectos de la

astronomía y la astrofísica contemporáneas. Aunque intenta liberar a la astronomía moderna de esa tendencia legendaria antropocéntrica y antropomórfica, no creo, sinceramente, que lo logre cabalmente. La tarea divulgativa de todo proceso de evolución natural —especialmente en astronomía— nos lleva, casi inevitablemente, a recurrir a analogías que no dejan de tener un profundo sentido antropomórfico. Copérnico desplazó a la Tierra del centro del sistema solar y del universo; sin embargo, el Sol, nuestro sol, quedaba como centro de nuestra galaxia. Shapley, llamado el Copérnico del siglo XX, demostró que el Sol es tan sólo una de tantos millares de estrellas ubicada en un lugar «insignificante» lejos del centro galáctico. No obstante, el gran Shapley indicó, por algún tiempo, que no existían galaxias externas a la nuestra.

Ahora, en nuestra época, la mayoría de los científicos postulan la formación de las estrellas mediante un proceso de contracción gravitacional y se cree en la expansión del universo a partir del átomo primigenio del abate Lemaître. El Premio Nobel de Física (1970), Hannes Alfven, señala con ironía y severidad el conflicto entre la mitología y la ciencia. Pero él mismo queda al borde del abismo.

Al leer las pruebas de imprenta del libro de divulgación de Luis Felipe Rodríguez, vuelvo a pensar en el reto al que nos enfrentamos ante una ciencia que sólo puede sobrevivir si se concibe como un proceso infinito, que día con día se supera y que nunca termina. Esta es la característica fundamental de toda verdadera ciencia; siempre debe y puede superarse, siempre será mejor. Esto la distingue de otras tareas intelectuales, especialmente algunas áreas de las humanidades y de las artes. No podemos decir que los humanistas, escritores o artistas del presente sean mejores que los del pasado. En cambio, la ciencia actual es mejor que la pretérita y la del futuro será superior a la presente.

GUILLERMO HARO

Prefacio

Son dos las razones principales que me llevaron a escribir este pequeño libro cuyo fin es presentar los más importantes descubrimientos astronómicos de nuestro tiempo: 1) como astrónomo profesional quiero compartir con otras personas el placer que me causa el conocimiento de tales hallazgos. Creo que constituyen uno de los aportes fundamentales del siglo XX a la cultura humana, y que por lo tanto, deben de ser divulgados tan profusa y adecuadamente como sea posible; 2) creo también que todos los seres humanos necesitamos interesarnos en algo misterioso, aún sin resolver, algo que parezca estar más allá de nuestras capacidades. Los científicos satisfacemos esta necesidad al afrontar los problemas que estudiamos. Por desgracia, muchas personas de pocos escrúpulos se han aprovechado de esta inquietud tan humana explotando en libros y otros medios de comunicación temas tales como la astrología (predicción del futuro mediante horóscopos), los ovnis, la percepción extrasensorial, etcétera. Sería casi imposible enumerar las decenas de libros que sobre estas pseudociencias se han publicado; muchos han alcanzado gran éxito. Aun cuando algunas de las pseudociencias ciertamente ameritan un estudio más cuidadoso, es también cierto que las pruebas que presentan en su favor son muy escasas, que son irreproducibles y, en muchos casos, falsas. Considero que el público también podría saciar su sed de misterio fijando su atención en los fenómenos fascinantes que la astronomía y las otras ciencias ponen al descubierto. Además, éstos tienen la ventaja de ser verdaderos. ¿Acaso no es extraordinario que conozcamos y estudiemos el nacimiento, la vida y la muerte de las estrellas? ¿No es también notable que experimentos contemporáneos sugieran la existencia de los hoyos negros, regiones irremediablemente separadas de nuestro universo? ¿No es digno de atención el hecho de que toda la materia del cosmos, incluida la que forma nuestro organismo, tuvo origen en una gran explosión cuyos efectos pueden medirse aún hoy por medio de diversos experimentos? Éstos son algunos de los temas cuyo mejor entendimiento ocupan al astrónomo de nuestro tiempo. De estos problemas y fenómenos quiero dar una descripción.

Escogí el titulo *Un universo en expansión* porque no sólo nuestro universo físico se expande, sino que también lo hace el universo de los conocimientos humanos. A ello contribuyen todas las ciencias, pero muy particularmente la astronomía. ¿Hasta dónde llegaremos? En este momento parecería que el único elemento que puede detener la expansión del saber de la humanidad es la humanidad misma.

I
La Tierra, un lugar que no tiene nada de especial

De pie sobre la superficie de la Tierra experimentamos una sensación de solidez e inmovilidad que hace difícil concebir que en realidad se mueve velozmente. Debido a esta sensación de inmovilidad, las culturas antiguas concluyeron que la Tierra era el centro del universo, un centro inmóvil, que se mantenía estático. A principios del siglo XVI el astrónomo polonés Nicolás Copérnico investigaba y trataba de describir las órbitas del Sol y los planetas entonces conocidos. Hasta entonces, los movimientos del Sol y los planetas se describían mediante un complejísimo modelo de círculos excéntricos que había sido perfeccionado por Tolomeo. Copérnico descubrió una manera muy sencilla de describir los movimientos orbitales, pero su modelo requería de una condición desconcertante: era el Sol y no la Tierra el que debería considerarse el centro natural de las órbitas de los planetas, incluida la Tierra.

¿Por qué si la Tierra tiene un movimiento de rotación y describe una órbita alrededor del Sol, nosotros la sentimos tan sólida e inmóvil? La razón es que lo que nuestros sentidos perciben son los *cambios* en el movimiento. Mientras el movimiento sea continuo, sin cambios bruscos, es imposible percibirlo. Por ejemplo, durante un vuelo de avión es fácil olvidar que estamos en movimiento. Es sólo cuando el avión pasa por una región turbulenta cuando nos damos cuenta de que nos desplazamos. La Tierra se mueve a más de cien mil kilómetros por hora en su órbita alrededor del Sol, pero lo hace de manera fluida y continua y, como si fuera una nave perfectamente estable, no percibimos su veloz movimiento.

La conclusión de Copérnico de que el Sol es el centro alrededor del cual orbitan los planetas fue la primera sacudida científica en el camino que nos ha llevado a la conclusión de que los seres humanos habitamos un lugar del universo que no tiene nada de especial. El paso siguiente lo dio Isaac Newton cuando enunció la ley de la gravitación universal a fines del siglo XVII. El Sol, que contiene el 99.9% de la masa total del Sistema Solar se halla en su centro y, a su alrededor, como granos de polvo, giran los planetas. La fuerza que la Tierra ejerce sobre el Sol es la misma que el Sol ejerce sobre la Tierra, pero debido a la mucho mayor masa del Sol, éste casi no se ve afectado. Si le damos un empujón a una bicicleta, ésta reaccionará; no será así si el empujón se lo damos a un camión. Por ello, el Sol casi no se mueve a causa de la atracción de los planetas, pero éstos si son afectados muy notoriamente por la fuerza de atracción del Sol. Es ésta la que mantiene a los planetas en su órbita alrededor del Sol. Si la fuerza de atracción gravitacional desapareciera, los planetas se moverían en línea recta abandonando tangencialmente sus órbitas.

El Sistema Solar tiene dos características básicas que debe explicar cualquier modelo teórico que pretenda definir su origen y evolución. Primero, todos los

planetas, con la excepción de Plutón, se hallan situados aproximadamente en un mismo plano y giran en el mismo sentido (véase la Fig. 1. a). Si el Sistema Solar se hubiese formado mediante la captura al azar de planetas por el Sol sería de esperarse que los planetas giraran en todas direcciones y sentidos (véase la Fig. 1. b).

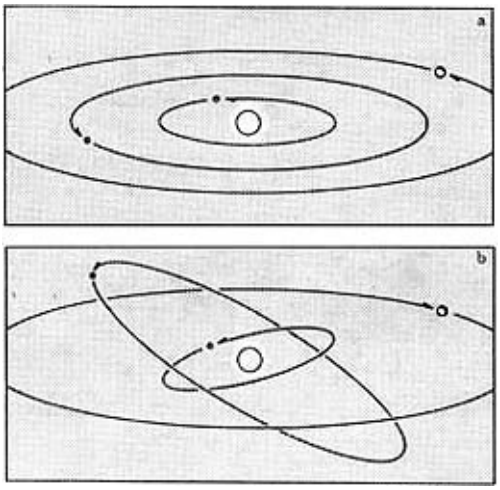


Figura 1.a) Los planetas del Sistema Solar se hallan situados aproximadamente en un mismo plano y giran alrededor del Sol en el mismo sentido. b) Si los planetas hubieran sido capturados al azar por el Sol, sus órbitas se desplazarían en todas direcciones y sentidos.

La segunda gran característica del Sistema Solar es que los planetas pueden dividirse en dos grupos: los planetas interiores o terrestres y los planetas exteriores o jovianos. Los planetas terrestres, cuyo prototipo es la Tierra, son pequeños y sólidos. Los planetas jovianos, cuyo prototipo es Júpiter, son esferas gaseosas sin superficie sólida, con diámetro unas diez veces mayor que el de los planetas terrestres (véase la Fig. 2).

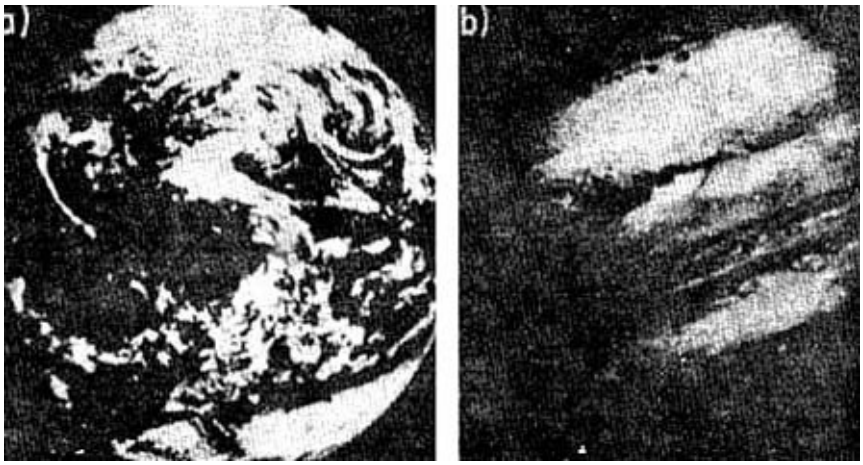


Figura 2. a) El prototipo de los planetas terrestre, pequeños y sólidos es, por supuesto, la Tierra. b) Los planetas jovianos, grandes y gaseosos, tienen como prototipo a Júpiter.

Estas dos características básicas hallan su explicación en el modelo que veremos más adelante, por el que se busca explicar la manera como se forman las estrellas y, con ellas, sus sistemas planetarios.

II
El Sol, la estrella más cercana

Casi toda la materia que constituye el universo está atrapada en forma de estrellas. Estas esferas gigantescas de gas caliente alcanzan diámetros que van de cientos a miles de veces el diámetro de la Tierra. Las estrellas tienen brillo propio porque en su centro las presiones y temperaturas son lo suficientemente elevadas como para propiciar que los átomos colisionen entre sí frecuente y fuertemente. En estas colisiones, a veces se fusionan dos o más núcleos atómicos para formar uno solo. A este fenómeno se le llama fusión termonuclear. En su forma más básica, este proceso fusiona cuatro átomos de hidrógeno para formar un átomo de helio. Estrictamente hablando, la masa no se conserva en este proceso físico. Si tomáramos cuatro gramos de núcleos de hidrógeno y los fusionáramos hasta convertirlos íntegramente en núcleos de helio, no obtendríamos exactamente los cuatro gramos de helio esperados, sino tan sólo 3.97 gramos.

¿Qué le sucede a la masa aparentemente desaparecida? Esta diferencia de masa se transforma en energía; concretamente es emitida como radiación de alta energía (véase la Fig. 3).

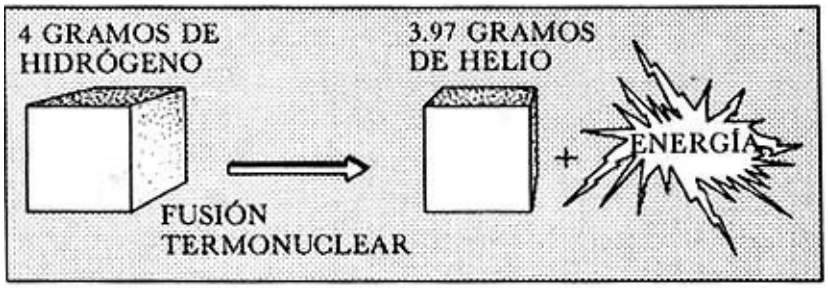


Figura 3. En el centro de las estrellas ocurre el proceso de la fusión termonuclear. Mediante este proceso, básicamente se fusionan cuatro núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio. Cuatro núcleos de hidrógeno pesan un poco más que un núcleo de helio, la diferencia de masa se transforma en energía.

Esta transformación de materia en energía es consecuencia de la equivalencia materia-energía, enunciada por Albert Einstein en su famosa fórmula $E = mc^2$; donde E es la energía resultante, m es la masa transformada en energía, y c es la velocidad de la luz (300 000 kilómetros por segundo). La cantidad de energía que se libera en los procesos de fusión termonuclear es fabulosa. Un gramo de materia transformado íntegramente en energía bastaría para satisfacer los requerimientos energéticos de una familia mediana durante miles de años.

La estrella más cercana a nosotros es, naturalmente, nuestro Sol, en cuyo centro el proceso de fusión termonuclear de hidrógeno en helio está ocurriendo en cantidades difíciles de concebir. Cada segundo, en el interior del Sol se transforman más de cuatro millones de toneladas de materia en energía. Esta energía resultante de las

reacciones termonucleares viaja desde el centro hasta la superficie del Sol, donde es radiada en forma de luz al espacio circundante. La Tierra intercepta sólo una cantidad ínfima de este flujo generosísimo de energía, y la casi totalidad escapa hacia el espacio interestelar. Algunos autores han especulado sobre la teoría de que una civilización más avanzada que la nuestra, en caso de que existiera, se vería obligada a causa de sus enormes necesidades energéticas a capturar toda la luz de su sol. Para lograrlo, tendrían que rodear su sol con una cáscara hecha de celdas solares que transformarían la luz en energía eléctrica. Esta sugerencia es altamente especulativa, pero desde el punto de vista de la física tiene sentido. En el caso de la Tierra, más del 99.9999999% de la energía lumínica del Sol escapa al exterior del Sistema Solar.

¿Por qué es el brillo del Sol tan enorme en comparación con las otras estrellas? La diferencia se debe simplemente a que el Sol está comparativamente cerca, mientras que las estrellas se hallan muy alejadas, a distancias astronómicas, que son tan enormes que sería muy engorroso darlas en metros o kilómetros. Como la luz del Sol tarda aproximadamente 500 segundos en llegar a la Tierra, y en un segundo recorre 300 000 km, encontramos que del Sol a la Tierra hay 300 000 × 500 = 150 millones de km, ¡150 millones de km! Una distancia en verdad descomunal. Pero, como veremos, insignificante si la comparamos con otras distancias. La siguiente estrella más cercana, *Proxima Centauri* (que en realidad forma parte de un sistema de tres estrellas), está a 4 años luz de distancia (un año luz será pues la distancia recorrida por un rayo de luz en un año). Esta distancia es aproximadamente 300 000 veces mayor que la distancia del Sol a la Tierra. No es pues de extrañar que las estrellas lejanas se vean como puntitos de luz, mientras que nuestra cercana estrella nos deslumbre. Así, las miles de estrellas que podemos observar a simple vista, y los millones que se pueden ver con un telescopio, son otros soles que quizá tienen sistemas planetarios como el nuestro.

Sin embargo, es muy importante aclarar que no todas las estrellas son copias idénticas del Sol. Las estrellas pueden tener diferentes masas que van desde las estrellas pequeñas, cuya masa es una décima parte de la del Sol, hasta aquellas cuya masa es sesenta veces la del Sol. Las estrellas más masivas crean en su interior temperaturas más grandes y por lo tanto generan más reacciones termonucleares por segundo. Esto da por resultado una mayor temperatura de la estrella y como mientras más caliente es un objeto, más azul es, estas estrellas brillan con tonalidad azul. Normalmente, las estrellas de masa intermedia, como el Sol, son amarillas, y las de masa menor rojas.

III
El nacimiento de una estrella

El universo está en continuo cambio, en incesante evolución. Pero esto es muy difícil de percibir debido a la lentitud con que los cambios ocurren. De hecho, nuestra experiencia cotidiana parece indicar lo contrario: un universo eterno e inmutable. ¿No vemos salir al Sol todos los días con el mismo resplandor? ¿No brillan las estrellas en un lugar fijo de la bóveda celeste? Esta engañosa inmutabilidad es consecuencia de la corta duración de nuestra vida en comparación con los larguísimos tiempos en que evolucionan las estrellas y los otros objetos cósmicos. Necesitamos usar nuestra inteligencia para descubrir esta lenta evolución.

Una mosca vive sólo unos días. Si fuera un ser inteligente le parecería que los seres humanos somos eternos e inmutables; tan poco es lo que envejecemos en el periodo de unos días. Pero la mosca podría darse cuenta de que existen diferentes tipos de seres humanos (niños, adultos, ancianos). ¿Son estos distintos tipos intrínsecamente diferentes? ¿O se trata de uno solo que evoluciona a través del tiempo cambiando su apariencia siendo primero niño, luego adulto, y luego anciano? Un problema similar tiene el astrónomo. De los cientos de millones de estrellas que puede estudiar ayudado de los telescopios encuentra que, aunque muchas son similares al Sol, también existen tipos diferentes. El astrónomo puede clasificar las estrellas analizando su luz. Esta luz es descompuesta en sus colores constituyentes mediante las llamadas técnicas espectroscópicas. Al pasar la luz de una estrella a través de un prisma (véase la Fig. 4), ésta se descompone como un arco iris, o sea formando el «espectro» de dicha estrella. Como se puede ver en la Fig. 5, los diversos tipos de estrellas tienen espectros completamente diferentes y es relativamente fácil clasificarlas. Las diferencias que existen entre las estrellas se deben principalmente a dos efectos: por una parte, hay estrellas de masa distinta y, como ya comentamos, las más pesadas son más azules (esta diferencia equivaldría, entre las personas, a las características individuales hereditarias). El segundo efecto vale para estrellas de masa idéntica pero que se encuentran en distintas etapas de su vida (esta diferencia sería equivalente a observar a dos personas que fueron muy similares al nacer, pero que nacieron en épocas distintas y que ahora una es un niño y la otra un anciano).

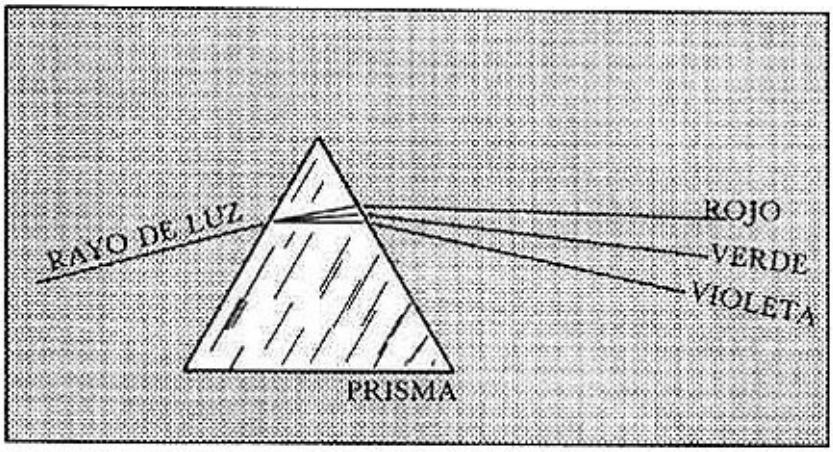


Figura 4. Es posible «descomponer» un rayo de luz en sus colores componentes haciéndolo pasar por un prisma. Al arco iris resultante se le llama el espectro de dicho rayo de luz. El estudio del espectro nos revela las características del cuerpo que emitió la luz.

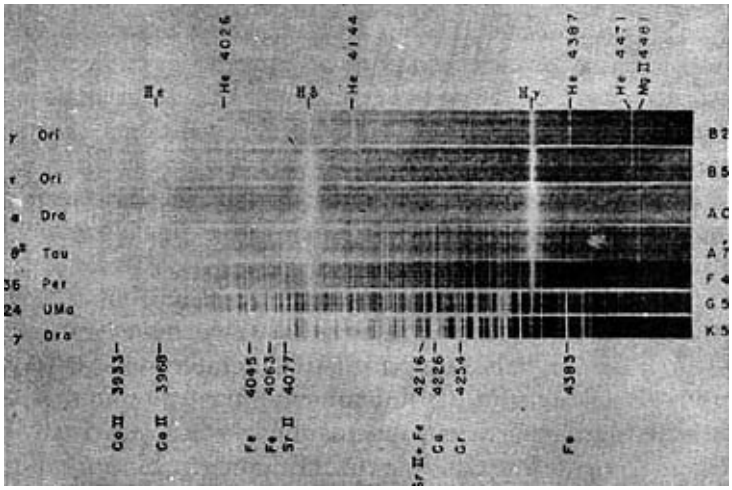


Figura 5. El espectro de la luz de una estrella puede grabarse en una placa fotográfica o bien cuantificarse en forma gráfica utilizando un detector electrónico. Hay diferencias obvias en el espectro de los distintos tipos de estrellas.

La idea de que las estrellas nacen, viven y mueren tiene amplio apoyo teórico y de observación. Las estrellas están radiando energía. Como todo físico sabe, este proceso se tiene que hacer a expensas de algo y no puede haber estado ocurriendo eternamente. Los astrofísicos han logrado desarrollar modelos matemáticos de computadora que predicen muy bien las características de las estrellas jóvenes, maduras, o viejas. Con la ayuda de una computadora, el científico puede simular en minutos los efectos del paso de millones de años.

Pero la prueba concluyente de que las estrellas nacen y mueren es lograr observar a algunas que estén naciendo y a otras que estén muriendo.

¿De dónde procede el material del cual nace una nueva estrella? El espacio entre las estrellas ya existentes está casi vacío. El *casi* se debe a que en el espacio interestelar existen nubes de gas constituidas fundamentalmente por átomos libres de hidrógeno y helio. Estas nubes son gigantescas, y llegan a tener cientos de años luz de

diámetro. Sin embargo, son muy tenues, sus densidades son infinitesimalmente pequeñas en comparación con la de, digamos, la atmósfera de la Tierra. Mezcladas con el gas que forma a estas nubes, hay también partículas de polvo que son opacas a la luz.

Este polvo bloquea la luz de las estrellas que se hallan detrás de la nube y debido a este efecto es que se puede detectar a las nubes (véase la Fig. 6). Pues bien, del gas libre que constituye a estas nubes se forman las nuevas estrellas. Esto ocurre de la siguiente manera: debido a alguna perturbación una parte de la nube comienza a contraerse ayudada por la atracción mutua de las partículas que la forman. Este proceso de contracción, llamado colapso gravitacional, hace que la densidad de la porción de la nube en colapso aumente más y más hasta que se constituye en un núcleo de alta densidad del cual se formará una nueva estrella (véase la Fig. 7).

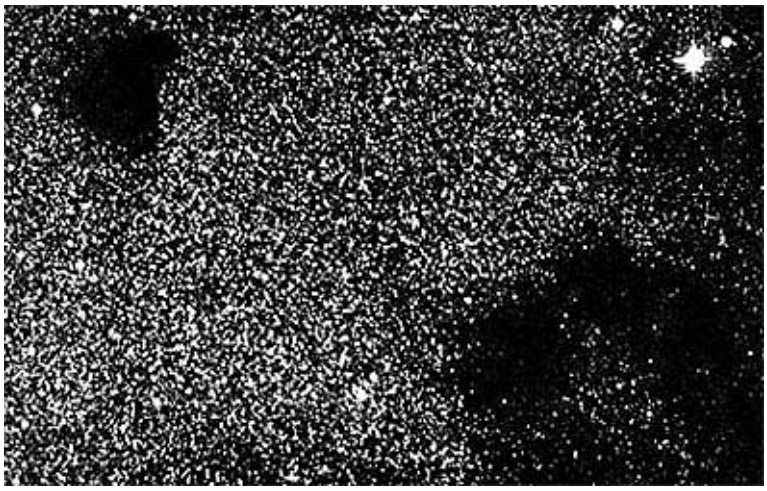


Fig. 6. Entre las estrellas existen grandes nubes de gas y polvo cósmico. Estas nubes proporcionan la materia prima de la que se condensan las nuevas estrellas. En esta fotografía, las nubes son visibles porque el polvo cósmico que contienen es opaco a la luz de las estrellas que se hallan detrás de ellas.

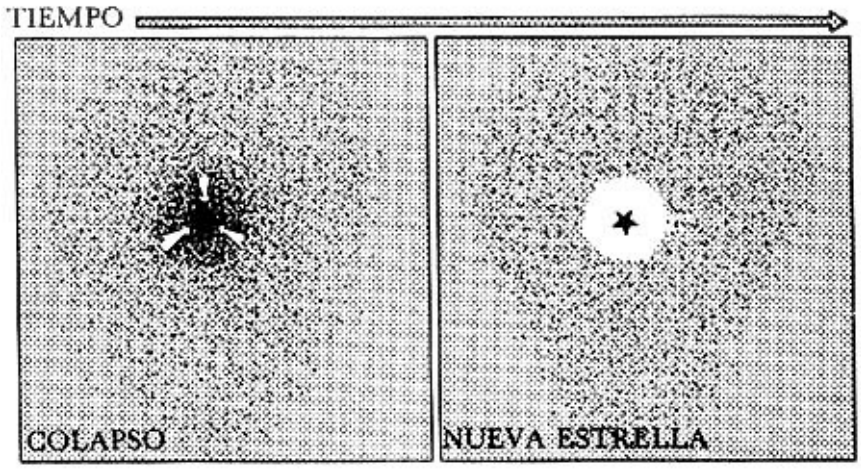


Figura 7. Una perturbación hace que una sección de la nube interestelar se condense hasta formar una nueva estrella.

Desafortunadamente, todo este proceso se da en el interior de la nube de la cual el

fragmento en colapso formaba parte. Como hemos dicho, las nubes interestelares son opacas al paso de la luz y por lo tanto no podemos observar las emisiones de la estrella recién nacida. Existe, pues, una cierta analogía entre el nacimiento de un ser humano y el de una estrella. El ser humano se forma en el seno materno, la estrella se forma en el seno de su nube materna. En ambos casos no es posible observar directamente el fenómeno. Pero como sucede en los estadios de la gestación de un ser humano en que se emplean radiaciones que pueden penetrar el cuerpo humano, las nuevas estrellas emiten también emisiones infrarrojas y de radio que sí logran escapar de la nube y que pueden ser estudiadas por los astrónomos. En la Fig. 8, la cruz muestra la posición de una nueva estrella descubierta debido a su emisión de ondas de radio.

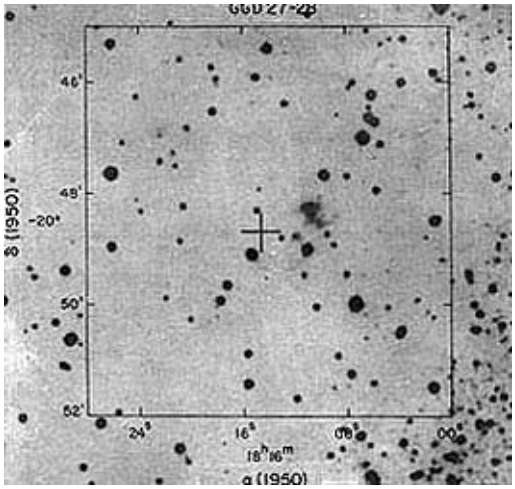


Figura 8. La cruz marca la posición de un nueva estrella formada en el seno de esta nube. La estrella no puede observarse en la fotografía, igual que un ser humano en gestación.

De manera simultánea a la formación de la nueva estrella, los astrónomos creemos que a su alrededor pueden ocurrir los procesos que llevan a la posible formación de un sistema planetario. Es importante aclarar que sólo estamos seguros de la existencia de nuestro sistema planetario, pero que es válido especular que dichos sistemas se hayan formado o se estén formando alrededor de otras estrellas.

Habíamos dicho que un modelo que describa la formación de un sistema solar como el nuestro debería ser capaz de explicar por qué las órbitas de los planetas están en un mismo plano y por qué los planetas terrestres son tan distintos de los jovianos. Los fragmentos de nube que se colapsan para formar una estrella deben, en general, tener movimientos internos caóticos. Sin embargo, es muy probable que, como un todo, el fragmento tenga una cierta cantidad de energía en rotación. Esta rotación presente hace que el colapso se modifique profundamente. En lugar de que se forme una esfera cada vez más pequeña, lo que se forma es una nube aplanada con un núcleo central (véase la Fig. 9). De este núcleo se formará la estrella, mientras que la parte aplanada evolucionará hasta condensarse en forma de planetas. Como éstos se

forman del disco gaseoso alrededor del núcleo, se explica que tengan sus órbitas en un mismo plano. Los astrónomos creemos que la formación de un disco alrededor del núcleo central es un fenómeno común, puesto que lo observamos no sólo en el Sistema Solar como un todo, sino también en Saturno y Júpiter, planetas que tienen sistemas de anillos y satélites con sus órbitas contenidas en un plano.

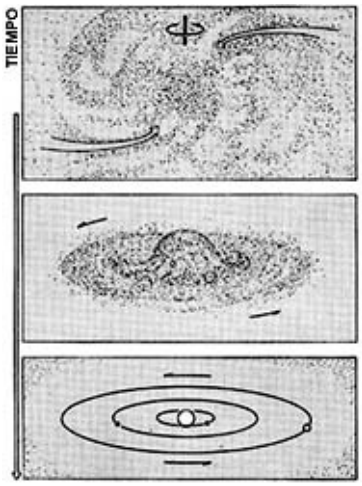


Fig. 9. El colapso de una nube con rotación lleva hacia una configuración con un núcleo rodeado de un disco de gas y polvo. Es muy probable que los planetas de nuestro Sistema Solar se hayan condensado de un disco como éste.

Por otra parte, cuando el núcleo central comienza a radiar luz y calor es de esperarse que los planetas más cercanos (los interiores o terrestres) sean calentados más que los planetas lejanos (los exteriores o jovianos). Los planetas de tipo terrestre son Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Los planetas de tipo joviano son Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Plutón, que tiene su órbita en un plano distinto al de los otros planetas, tampoco encaja en esta clasificación. Pero volvamos a la formación del Sistema Solar. Dada la densidad del disco alrededor del protosol (sol en formación) comenzaron a chocar y juntarse los granos de polvo existentes en él. Este polvo está formado por núcleos de material rocoso rodeados por una cáscara de hielos de agua, amoniaco y metano. En los planetas cercanos al Sol las cubiertas de hielo se evaporaron, quedando sólo los resistentes núcleos de material rocoso. Esto no ocurrió en la parte externa del Sistema Solar. Así, se fueron formando, de este polvo, piedras y de las piedras, planetesimales, y de los planetesimales, planetas. Pero los planetas internos se formaron de los núcleos rocosos y son por eso sólidos, mientras que en la parte externa los planetas se formaron de granos que aún tenían su cubierta de hielo. Por eso son más grandes y los hielos, al sublimarse, formaron esferas gaseosas. Los núcleos rocosos que participaron en la formación se hallan asentados en el centro de los planetas de tipo joviano.

Después de su formación, la estrella central despeja, con la presión de su radiación y con un flujo de partículas de alta velocidad, los residuos de gas que quedaron a su alrededor y en el espacio interplanetario. Una vez libres de esta

«placenta» es posible observar a las estrellas con un telescopio que capte la luz visible. Durante su infancia, las estrellas se estabilizan y entran en un largo periodo de madurez. Es una fortuna para la vida inteligente en la Tierra que las estrellas tengan esta larga y estable etapa (llamada la secuencia principal). El Sol se halla en medio de este periodo de tiempo, pues han transcurrido 4 500 millones de años desde la formación del Sistema Solar. Si el Sol sufriera ahora los cambios e inestabilidades de sus primeros 10 millones de años de existencia, desaparecería la vida debido a los cambios bruscos de temperatura que ocurrirían en la Tierra. El Sol volverá a pasar por etapas convulsivas e inestables que probablemente ocasionarán la desaparición de la vida en la Tierra. Pero tal cosa ocurrirá en un futuro muy lejano, en otros 4 500 millones de años, cuando el Sol agote su combustible termonuclear y comience a sufrir los estertores agónicos que precederán a su muerte como estrella.

IV
Las tres muertes posibles de una estrella

Durante su vida adulta, las estrellas producen luz y calor mediante procesos de fusión termonuclear que ocurren en su interior. Es tan grande la masa de una estrella y tan eficiente el proceso nuclear, que la producción de energía puede ser mantenida por muchísimo tiempo. En el caso del Sol, nos quedan todavía alrededor de 4 500 millones de años antes de que el marcador llegue a cero. Pero en otras partes del universo podemos observar estrellas que se formaron antes que el Sol y que se encuentran sufriendo ya las convulsiones de la muerte estelar.

Pero no es el mismo tipo de muerte el que espera a todas las estrellas. Su destino lo determinará que sean ligeras o pesadas. Son ligeras las estrellas cuya masa es menor a seis veces la del Sol; es decir, que nuestro Sol está dentro de la categoría de las estrellas ligeras.

Las estrellas ligeras, después de una larga etapa de madurez en la secuencia principal, aumentan su tamaño hasta alcanzar un diámetro cientos de veces mayor al que tenían durante su vida estable. Cuando una estrella está en esta etapa se le llama, apropiadamente, *una gigante roja*. Los astrónomos han catalogado y estudiado a un gran número de estas estrellas (véase la Fig. 10). Cuando el Sol crezca hasta convertirse en una gigante roja, englobará a la Tierra, quemando y destruyendo a la vida que entonces pueda haber. Después de este periodo como gigante roja, comenzará el Sol a sufrir una etapa de encogimiento volviendo a pasar por el diámetro que ahora tiene y seguirá reduciéndose hasta alcanzar un diámetro similar al de la Tierra. A las estrellas en esta etapa terminal se les conoce como *enanas blancas* y, de nuevo, son muchísimas las que se conocen y estudian con gran detalle. Agotado su combustible nuclear, la estrella comienza un lento pero inexorable proceso de enfriamiento. Igualmente, su luz se va extinguiendo poco a poco. Así, a la Tierra le espera primero la calcinación y luego el congelamiento.

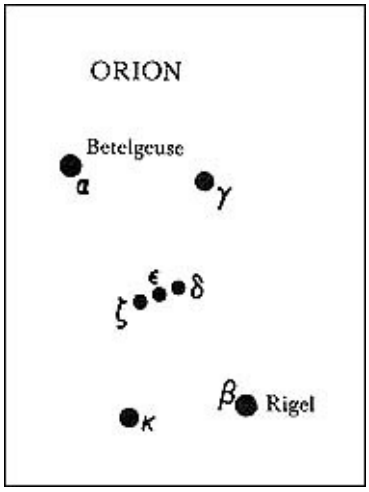


Figura 10. Betelgeuse, la más brillante de las estrellas de la constelación de Orión, es una supergigante roja que se acerca al final de su vida.

A las estrellas con masa mayor a seis veces la del Sol, que hemos llamado pesadas, les espera un destino aún más espectacular y cataclísmico. Una vez agotado el combustible nuclear, la estrella se encuentra repentinamente sin presión interna que detenga a la atracción gravitacional. La estrella se colapsa rápida y violentamente. Esto crea en su interior presiones elevadísimas, fusionando a los protones y electrones para crear neutrones y liberando energía en gran cantidad. Las capas exteriores de la estrella absorben esta energía y salen disparadas hacia afuera, mientras el núcleo continúa su colapso (véase la Fig. 11). Las capas exteriores se expanden a grandes velocidades formando bellas nebulosidades que son testigos mudos de la violenta explosión (véase la Fig. 12), fenómeno que se conoce como supernova.

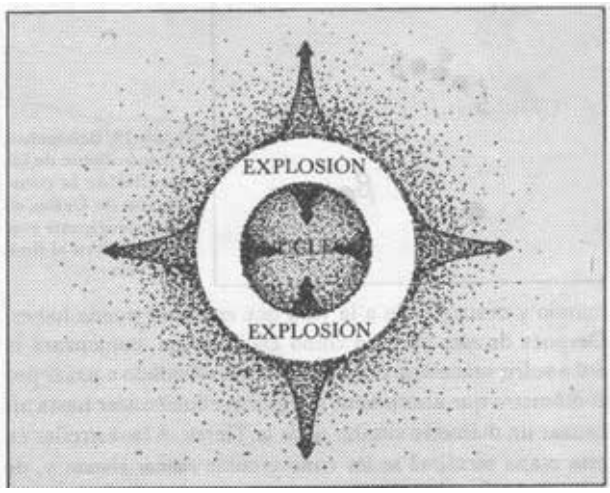


Figura 11. Las estrellas masivas acaban su vida en una explosión cataclísmica llamada supernova. Mientras el núcleo de la estrella se comprime a densidades enormes, las capas exteriores son expulsadas violentamente.

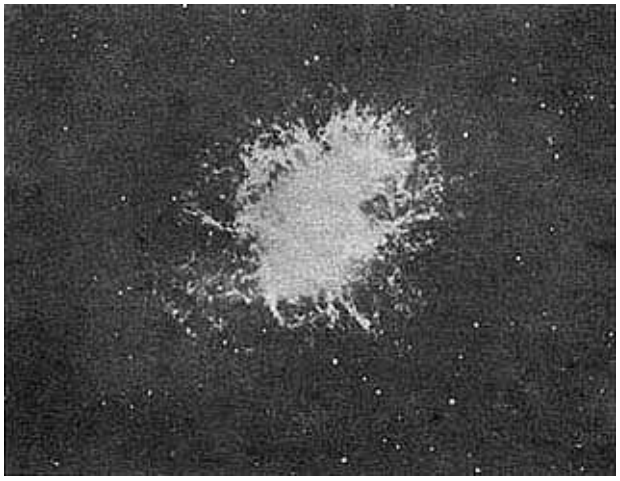


Figura12. La nebulosa del Cangrejo. Esta nube de gas, aún en rápida expansión, era la parte exterior de una estrella que explotó como supernova en 1054.

Durante los primeros meses que siguen a la explosión, la supernova alcanza el brillo de mil millones de soles. En la Fig. 12 se muestra la nube de gas en expansión que queda como evidencia de la estrella que explotó en 1054 d. C., en la constelación del Toro. Esta explosión fue observada y registrada por los astrónomos chinos. En el centro de la nube se halla un pulsar que ha sido estudiado detalladamente. El pulsar es una estrella de neutrones que emite pulsos de radio. La del Cangrejo da treinta revoluciones por segundo. A la nube de gas se le llama la nebulosa del Cangrejo porque los filamentos que tiene recuerdan las patas de un cangrejo.

Si la estrella tenía una masa entre seis y treinta veces la masa del Sol, el núcleo en colapso logra estabilizarse. Éste está formado exclusivamente de neutrones, y de ahí su nombre, estrella de neutrones. ¿Se observan en el cielo este tipo de estrellas? Con un telescopio que capte luz visible no se les puede detectar porque son pequeñísimas, como de unos 10 kilómetros de radio, y emiten muy poca luz visible. Sin embargo, poseen en su superficie regiones que emiten intensas ondas de radio que sí pueden ser estudiadas. Como las estrellas de neutrones rotan velozmente, actúan como un faro cósmico. Cada vez que dan una vuelta, la región que emite ondas de radio apunta hacia la Tierra (véase la Fig. 13).

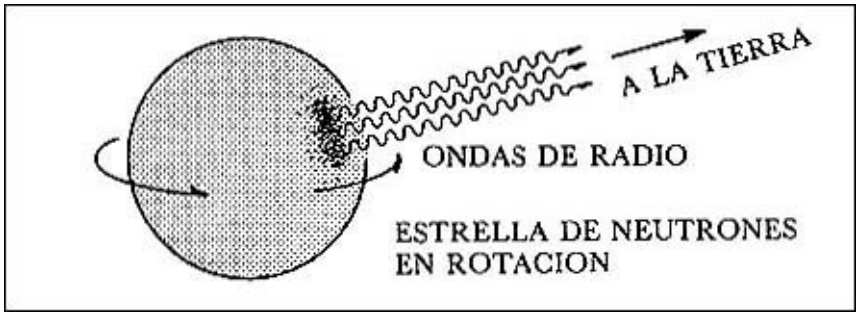


Figura 13. Las estrellas de neutrones rotan velozmente y tienen en su superficie regiones que emiten copiosas ondas de radio. Cada vez que la región emisora pasa enfrente, se detecta un pulso, como si se tratara de un faro.

Este tipo de emisión de radio en pulsos fue detectado por vez primera en 1967 por los radioastrónomos británicos Jocelyn Beil y Antony Hewish. O sea que las estrellas de neutrones y los pulsares son el mismo objeto. En la actualidad se conocen varios cientos de pulsares (estrellas de neutrones).

Aun cuando las enanas blancas y las estrellas de neutrones son objetos fantásticos, no cabe la menor duda de su existencia. Sus características son casi increíbles. Las estrellas de neutrones son densísimas; el contenido de una cuchara de la materia que forma una estrella de neutrones pesa más que cien millones de elefantes; sin embargo cientos de ellas son estudiadas a diario por los astrónomos.

El tercer posible estado terminal de una estrella presenta características aún más desconcertantes. Si la estrella tenía originalmente más de treinta veces la masa del Sol, su núcleo continúa colapsándose más allá de la etapa de estrella de neutrones hasta formar un hoyo negro (véase la Fig. 14).

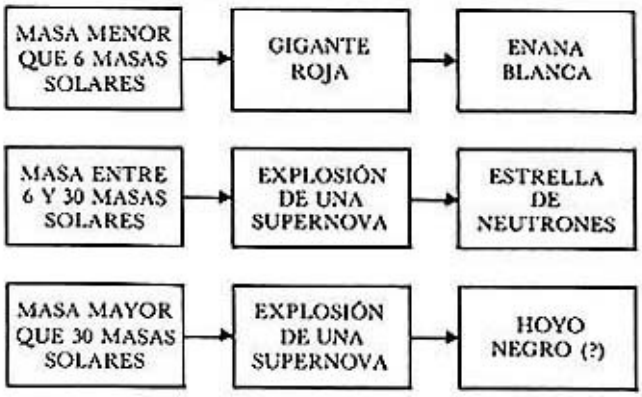


Figura 14. De acuerdo con su masa original, las estrellas acaban su vida de manera distinta. Las etapas terminales de enana blanca y estrella de neutrones han sido corroboradas mediante la observación. Sin embargo, la existencia de los hoyos negros es aún discutida.

A diferencia de las enanas blancas y las estrellas de neutrones, que son observadas y estudiadas rutinariamente, no existe aún prueba definitiva de que los hoyos negros existen. ¿Por qué? El hoyo negro que la teoría predice que se debe formar a consecuencia del colapso de una estrella, tendría un radio de sólo unos kilómetros. La fuerza de gravedad en un hoyo negro es tan grande que ni la luz alcanza a salir de él, ya no digamos un cuerpo material. Como el astrónomo estudia a los objetos cósmicos de acuerdo con la radiación que emiten, parecería que un hoyo negro estaría condenado a permanecer por siempre indetectado. Sin embargo, existen procedimientos para descubrir de manera indirecta a un hoyo negro.

A diferencia del Sol, que es una estrella solitaria, muchas estrellas coexisten en pareja. Supongamos que una de las estrellas de la pareja evoluciona hasta convertirse en un hoyo negro. Si bien un hoyo negro no emite luz de ningún tipo, sí continúa ejerciendo atracción gravitacional sobre sus contornos. Como antes de que una de ellas se convirtiera en hoyo negro, las dos estrellas continuarán orbitando una

alrededor de la otra como dos danzantes que valsean. Pero ahora es sólo una estrella la que valsea con una pareja invisible, el hoyo negro. Se ha observado ya varias estrellas que giran alrededor de un compañero invisible. El prototipo es la estrella HDE 226868, asociada a una fuente de rayos X llamada Cisne X. Si la estrella está cercana al hoyo negro, éste le arrebatará gas de sus capas exteriores, y la atraerá hacia sí, tragándola hacia su interior. En el paso de la estrella al hoyo negro, el gas es calentado a grandes temperaturas, emitiendo intensamente rayos X. Esto es precisamente lo que se observa en Cisne X.

Para detectar los rayos X, que no penetran la atmósfera terrestre, fue necesario colocar satélites astronómicos en órbita por arriba del manto protector de nuestra atmósfera que no permite que los destructores rayos X alcancen la superficie terrestre. Sin embargo, aún no se acepta que Cisne X es un hoyo negro, porque también la presencia de una estrella de neutrones «obesa» podría explicar las observaciones hechas. La masa del compañero de Cisne X es de más de ocho veces la masa del Sol, mientras que se supone que las estrellas de neutrones no pueden exceder de cuatro masas solares. Esta situación favorece la teoría de que Cisne X sea un hoyo negro, pero los astrónomos son personas muy escépticas y quieren pruebas contundentes y muy claras. Recientemente, se ha sugerido que en el núcleo de algunas galaxias, entre ellas la nuestra, mora un hoyo negro con masa formidable, millones de masas solares y aún más. Estos hoyos negros supermasivos pudieron haberse formado junto con el resto de la galaxia hace alrededor de diez mil millones de años. Quizás el estudio de este tipo de objetos en el núcleo de las galaxias dé la evidencia sólida e indiscutible que los astrónomos más incrédulos reclaman.

V
La Vía Láctea: nuestra galaxia

Al final de nuestro capítulo anterior usamos la palabra galaxia. ¿Qué es una galaxia? Nuestro Sol es sólo una de un número inmenso de estrellas que forman un conglomerado de forma aplanada de dimensiones también muy grandes. Este conglomerado de estrellas y nubes de gas tiene la forma de un disco con una protuberancia en su centro (véase la Fig. 15). El Sol y su sistema planetario se encuentra cerca de una de las orillas de este disco, perdidos como un grano de arena entre las otras cien mil millones de estrellas que lo integran. Este es un número de estrellas muy grande, diez veces mayor que el número de neuronas que hay en el cerebro humano. Nuestra galaxia es, pues, este colosal disco de estrellas y gas que gira majestuosamente alrededor de su centro. Habíamos dicho que un rayo de luz tarda ocho minutos en viajar del Sol a la Tierra. Pues bien, un rayo de luz que partiera del Sol tardaría 30 000 años en llegar al centro de nuestra galaxia. Así como la Luna gira alrededor de la Tierra, y la Tierra alrededor del Sol, el Sol gira alrededor del Centro de la galaxia. A la Tierra le toma un año dar una vuelta alrededor del Sol; al Sol, 200 millones de años concluir una revolución alrededor del centro de nuestra galaxia.

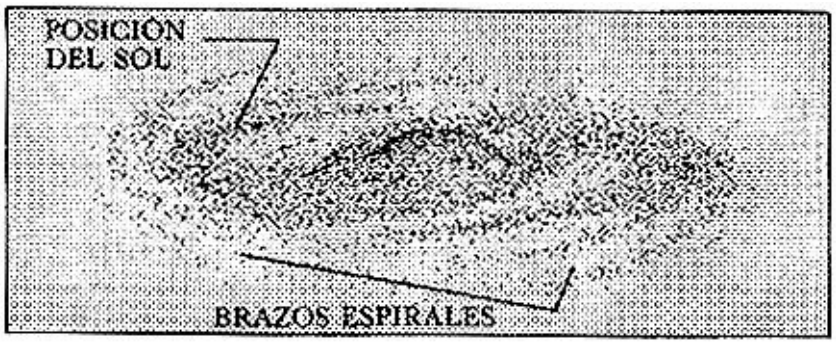


Figura 15. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es un conglomerado de forma aplanada constituido por cien mil millones de estrellas. Nuestro Sol se halla cerca de una de sus orillas.

Como la galaxia tiene forma de disco uno esperaría ver a las estrellas agrupadas en una banda que parecería rodear a la Tierra (véase la Fig. 16). Esta banda de luz es precisamente lo que los romanos bautizaron como la Vía Láctea. Lejos de las ciudades, en una noche oscura y despejada, es posible ver esta banda de apariencia lechosa que cruza al cielo de lado a lado. Es un espectáculo maravilloso que no es posible admirar desde la ciudad, porque el reflejo en el cielo de las luces artificiales no permite distinguir el brillo delicado de lo que es el plano de nuestra galaxia. Las estrellas que observamos fuera de la Vía Láctea son generalmente estrellas muy cercanas que aparecen proyectadas en todas direcciones (véase la Fig. 16).

Figura 16. Respecto al Sol, la mayoría de las estrellas y nubes interestelares parecen estar en una banda, que los romanos llamaron la Vía Láctea.

Los astrónomos hemos estudiado nuestra galaxia exhaustivamente. Conocemos su forma y tamaño, lo cual es difícil de lograr, puesto que equivale a estar dentro de una casa y decir de qué estilo y qué tan grande es. En este último caso, lo más fácil es simplemente salirse de la casa y verla desde afuera. Nosotros estamos dentro de la galaxia y dadas las enormes distancias no podemos salir.

Así como por mucho tiempo se creyó que la Tierra era el centro del universo, los astrónomos consideraron, en un principio, conveniente colocar el Sol en el centro de nuestra galaxia. De nuevo encontramos aquí una tendencia, quizás involuntaria, de tratar de distinguir al ser humano en el contexto cósmico. Pero parece que, en efecto, el Sol no tiene nada de especial porque en 1918 el astrónomo Harlow Shapley desmintió la creencia de que el Sol estaba en el centro de la galaxia. Shapley realizó observaciones de unos conglomerados de estrellas que parecen acompañar a nuestra galaxia, tal como un enjambre de abejas que revolotea alrededor de un panal. Estos conglomerados de estrellas se llaman *cúmulos globulares* por su forma más o menos circular (véase la Fig. 17). Cada cúmulo globular está formado por alrededor de un millón de estrellas, lo cual suena a mucho, pero en realidad es un número pequeño en comparación con los cien mil millones de estrellas de nuestra galaxia. Distribuidos alrededor de la galaxia existen varios cientos de cúmulos globulares. Shapley encontró que los cúmulos globulares no aparecían distribuidos homogéneamente en todo el cielo, sino que la mayoría se concentraba en dirección de la constelación de Sagitario. De esto, concluyó que si el centro de masa de los cúmulos coincidía con el centro de la galaxia, dicho centro se hallaba en la dirección de Sagitario y que por lo tanto el Sol estaba desplazado hacia una orilla de la galaxia.

Figura 17. Los cúmulos globulares son conglomerados de estrellas que acompañan a la Vía Láctea. Aun cuando pueden contener millones de estrellas son insignificantes cuando los comparamos con nuestra galaxia, que contiene cien mil millones de estrellas.

Nuestra galaxia es un verdadero zoológico de entes cósmicos. Contiene todo tipo de estrellas, nubes de las cuales se forman nuevas estrellas, estrellas que luego de ser gigantes rojas, eyectan una voluta de gas (véase la Fig. 18), antes de continuar su evolución para convertirse en una enana blanca. El astrónomo trata de explicarse la existencia de todos estos objetos utilizando un esquema tan sencillo como sea posible. La teoría de la evolución estelar le proporciona el marco de referencia necesario para explicarse la diversidad de objetos que existen en el cielo.

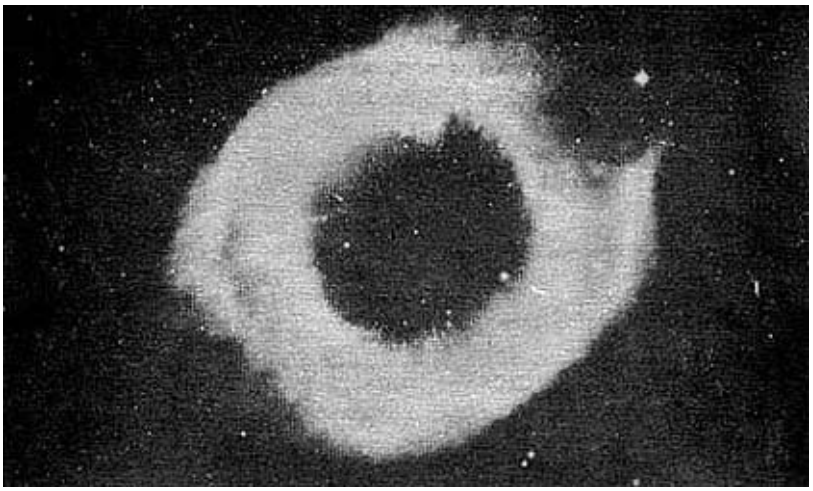


Figura 18. Las llamadas nebulosas planetarias son volutas de gas eyectadas por una gigante roja. Se les llama nebulosas planetarias porque en los telescopios antiguos se las veía redondas y verdosas, como se observa a algunos planetas, pero no tienen relación directa con éstos.

Como hemos visto, las estrellas nacen, tienen una larga vida estable y mueren. Conforme su existencia transcurre, se transfiguran en objetos de distintas características. El esquema de evolución estelar tiene pues una propiedad muy poderosa: permite explicar la naturaleza de objetos que al parecer no tienen nada que ver entre sí, pero que en realidad son caras diversas que presentan las estrellas.

Nuestra galaxia está, pues, constituida por un gran numero de estrellas en distintos estados evolutivos, así como una metrópolis alberga infantes, personas maduras y ancianos.

VI
Galaxias por doquiera

Más allá de los confines de nuestra galaxia se extiende un espacio que debe estar muy vacío: hasta ahora no se ha podido detectar en él estrellas o gas. Sin embargo, nuestra galaxia no es todo el universo. Si continuamos avanzando en este espacio tenue que existe fuera de nuestra galaxia, tarde o temprano nos encontraremos con otra galaxia. Las hay aplanadas como la nuestra; a este tipo se le llama galaxia espiral porque de su centro parten dos brazos de forma espiral (véase la Fig. 19). También las hay más o menos redondas; son las llamadas galaxias elípticas (véase la Fig. 20). Finalmente, a las galaxias que no caen en ninguna de las dos clasificaciones anteriores las llamamos galaxias irregulares.

Figura 19. Las galaxias espirales reciben su nombre de los brazos que parecen salir de sus regiones centrales.

Figura 20. Las galaxias elípticas son esferoides de estrellas carentes generalmente del gas y polvo que existe en las galaxias de tipo espiral.

Cada galaxia externa tiene, como la nuestra, estrellas por los cientos de miles de millones. Y con los telescopios más poderosos se podrían observar miles de millones de galaxias. Debido a su aislamiento entre sí, a las galaxias se les daba el romántico

término de universos-isla, como si cada galaxia fuese una isla en el vasto mar del espacio intergaláctico. La distancia que separa a las galaxias es inmensa. Una de las galaxias más próximas a nosotros es la de Andrómeda (véase la Fig. 21). La luz que de ella podemos observar hoy, comenzó su viaje hace más de dos millones de años, antes de que apareciese el hombre en la faz de la Tierra. Igualmente, la luz que en este momento emiten las estrellas de nuestra galaxia tardará más de dos millones de años en llegar a Andrómeda.

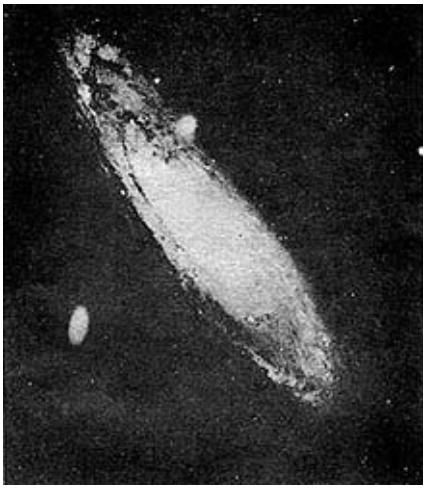


Figura 21. La galaxia de Andrómeda, de tipo espiral, es una de las más cercanas a la nuestra.

Al astrónomo no lo perturba el estudiar objetos de dimensiones tan colosales como las galaxias. Esto se debe a que con la base de estudiar primero el Sol y luego las estrellas cercanas, sabe que estas otras galaxias son conjuntos de otras estrellas, objetos que conoce bien.

Hay, sin embargo, fenómenos que ocurren en el centro de las galaxias que aún no son bien entendidos. Las regiones centrales de algunas de ellas emiten energía en cantidad tan grande que el fenómeno no se puede explicar simplemente proponiendo que ahí hay concentrado un gran número de estrellas. Más aún, esta energía radiada varía de mes a mes, mientras que la luz de las estrellas normales es muy constante. Esta actividad inusitada de las regiones centrales de algunas galaxias se ve a veces acompañada de la presencia de dos chorros de gas que emiten ondas de radio muy intensas (véase la Fig. 22). Estos fenómenos de alta energía no se pueden explicar en términos de estrellas, ni siquiera de un gran número de estrellas. Esta incapacidad ha llevado a formular la proposición de que en el centro de algunas galaxias, quizá de todas ellas, existe un hoyo negro supermasivo con la masa de millones de soles. Este hoyo negro podría ser la «máquina» capaz de generar esas grandes cantidades de energía, así como los chorros simétricos de gas. El modelo supone que alrededor del hoyo negro existe gas en rápida rotación (véase la Fig. 23). Este gas se calentaría a altas temperaturas debido a la fricción que esta rotación produjera. La fricción también provocaría que el gas cayera en trayectoria espiral hacia el hoyo negro. Así,

antes de ser tragado por el hoyo negro, este gas calientísimo se despediría de nuestro universo emitiendo energía violentamente. En este modelo, el hoyo negro se convierte en una verdadera fábrica de energía, que transforma la energía gravitacional en energía de radiación. Aun en nuestra aparentemente tranquila galaxia se ha encontrado evidencia de la posible existencia de un hoyo negro supermasivo. En su centro se ha estudiado a una nube de gas que posee una velocidad de rotación muy alta. La fuerza centrífuga de esta nube es grande, y que no se haya dispersado requiere de la existencia en su centro de un objeto con la masa de millones de soles que proporcione la fuerza de atracción gravitacional necesaria para estabilizar a la nube. El caso extremo de producción de energía son los cuasares, llamados así por su apariencia *cuasiestelar* (parecida a una estrella). Hoy se sabe que los cuasares emiten radiación en cantidad mucho mayor que el núcleo de las galaxias normales. Por otra parte podría haber una relación muy íntima entre los cuasares y el núcleo de las galaxias. Los cuasares sólo parecen existir en los confines del universo; no hay cuasares cercanos. La luz que nos llega de los cuasares partió de ellos hace miles de millones de años. Son, pues, objetos que existieron en el pasado y que podemos estudiar hoy porque su luz nos está llegando ahora. Muchos astrónomos creen que los cuasares son núcleos de galaxias jóvenes recién formadas; en la actualidad ya no hay formación de nuevas galaxias, por lo que no observamos cuasares cercanos. En el pasado muchas galaxias, quizá también la nuestra, tuvieron en su núcleo a un cuasar; el cuasar fue muy brillante en su juventud, pero hoy se halla apagado o dormido.

Figura 22. Las radiogalaxias son galaxias con fuerte emisión de radio que proviene de dos chorros de gas que salen de su núcleo.

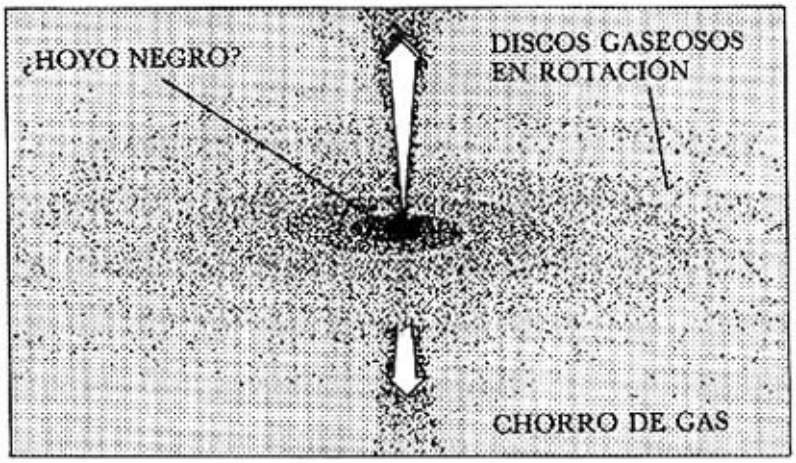


Figura 23. Para explicar la eyección de chorros de gas en el núcleo de galaxias se ha propuesto la existencia de un hoyo negro supermasivo rodeado de una nube de gas en rotación en un modelo que se describe en el texto.

El problema de cuál es la fuente de energía del núcleo de las galaxias y cuasares es uno de los más importantes y difíciles que enfrenta el astrónomo del siglo XX. Y, ¿quién puede saberlo?, los eficientes mecanismos de producción de energía que están involucrados podrían ayudar a resolver los requerimientos energéticos de la humanidad futura.

VII
Un universo en expansión

En este universo ocupado por galaxias de formas diversas, el astrónomo busca responderse las preguntas realmente fundamentales: ¿de dónde viene todo esto?, ¿a dónde va?

Pero en lugar de sentarse en espera de la iluminación divina que le dé la respuesta, continúa su labor, muchas veces modesta. Sabe que su trabajo puede referirse a algún tipo de estrella en particular, a algún fenómeno aparentemente poco importante y no a las grandes preguntas, pero también sabe que todo nuevo conocimiento es una pieza más del rompecabezas. Además, nunca sabe uno cuándo el estudio sistemático de objetos aparentemente sin importancia puede dar lugar a un hallazgo de importancia básica.

Durante la década de 1920, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble estaba dedicado a estudiar la luz emitida por las galaxias externas. No se esperaba que esta luz tuviera nada de especial. Después de todo, es simplemente la luz sumada de miles de millones de estrellas como las que conocemos tan bien en nuestra galaxia.

En efecto, el espectro de las galaxias que Hubble obtenía con el telescopio de 100 pulgadas del Observatorio de Monte Wilson era lo esperado: la suma de la luz de un gran número de estrellas. Y, sin embargo, tenía algo desconcertante.

Cuando la luz de una estrella es descompuesta espectroscópicamente, en el espectro resultante aparecen rayas oscuras, partes del espectro que contienen menos luz que las adyacentes. La explicación de estas rayas es sencilla: en la superficie de las estrellas hay una gran cantidad de átomos, algunos pueden absorber luz de un color bien determinado. En particular, el calcio produce dos rayas espectrales muy oscuras que son fáciles de distinguir en el espectro de una estrella y por lo tanto de una galaxia. Para su asombro, Hubble encontró que las rayas del calcio no aparecían en la región del espectro donde se esperaba, que es la región violeta, sino que aparecían corridas hacia la región roja. Este corrimiento al rojo de las rayas de calcio significa que las galaxias que emiten dicho espectro se alejan de nosotros velozmente (véase la Fig. 24). Este efecto de cambio en el color de la radiación emitida por un cuerpo que se aleja del observador es equivalente al cambio en el tono de la sirena de una ambulancia cuando pasa junto a nosotros y después se aleja. A este efecto se le llama *efecto Doppler*, en honor al físico austriaco que lo estudió en gran detalle en el siglo XIX.

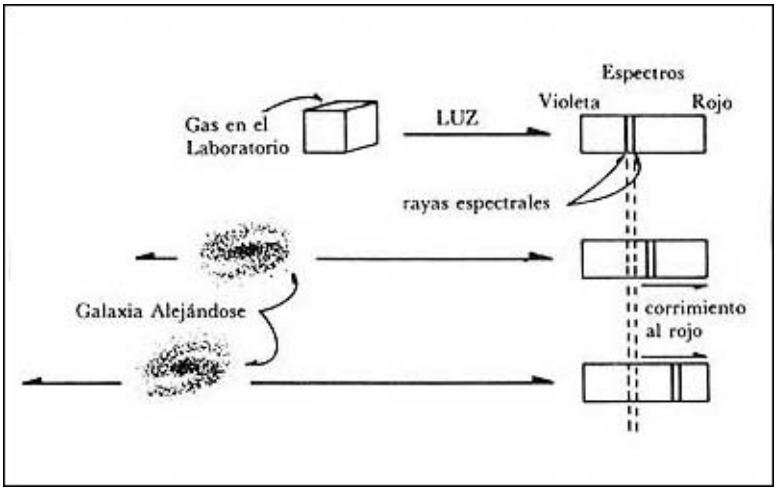


Figura 24. El corrimiento al rojo de la luz proveniente de las galaxias. Mientras mayor es la velocidad de alejamiento más corridas al rojo aparecen las rayas espectrales.

Hubble continuó estudiando este fenómeno y encontró que, si suponía que las galaxias que se ven más pequeñas en el cielo son las más alejadas, eran éstas también las que se alejaban más rápido de la nuestra. Esto lo expresó matemáticamente en lo que hoy conocemos como la Ley de Hubble: $v = HD$.

En esta ecuación v es la velocidad de alejamiento de la galaxia en cuestión y D es su distancia a nuestra galaxia. H es la llamada constante de Hubble.

¡Un universo en expansión! Ciertamente, nadie se lo esperaba. Es importante aclarar que, aun cuando las velocidades de alejamiento son muy grandes, las distancias son aún mayores, así que no podemos apreciar directamente el fenómeno de alejamiento en nuestras vidas. Pero si viviésemos cientos de millones de años podríamos apreciar, a través de este lapso, cómo las galaxias se van alejando, haciéndose cada vez más pequeñas a la observación.

Por supuesto, este monumental descubrimiento llevaba a una cuestión muy importante: ¿qué pudo haber sido el fenómeno tan poderoso que arrojó en todas direcciones a las inmensas galaxias como si fueran gotas de agua?

Hizo falta la colaboración de muchas de las mentes más lúcidas entre los astrónomos de principios de nuestro siglo XX, para llegar a la conclusión de que nuestro universo se había originado en el pasado muy remoto en una titánica gran explosión.

VIII
La gran explosión

Aproximadamente diez años antes del descubrimiento de la expansión del universo, el físico Albert Einstein había desarrollado su teoría general de la relatividad. Como parte de las aplicaciones a su teoría, Einstein elaboró un modelo matemático del universo que no aceptaba como solución un universo estático y exigía que el universo estuviese en contracción o bien en expansión. Einstein encontró este resultado poco satisfactorio y, para evitar confrontarlo, introdujo en sus ecuaciones un término arbitrario, la constante cosmológica, que permitía que el modelo diera como solución un universo estático.

Años después, cuando Einstein se enteró del resultado de las observaciones de Hubble, reconoció que sus ecuaciones en la forma original eran más adecuadas para describir el universo y llamó a la introducción de la constante cosmológica, «el más grande error de mi vida».

Varios de los físicos y matemáticos más destacados de los años treinta como el abate Georges Lemaître, dedicaron gran parte de su tiempo a la elaboración de modelos matemáticos que explicaran por qué se expande el universo. La mayoría de los modelos coinciden en la necesidad de una explosión en el pasado remoto. Llegar a esta conclusión no es difícil.

Si echamos imaginariamente a andar el tiempo en reversa, encontramos que, como las galaxias se alejan entre sí (véase la Fig. 25), en el pasado estaban más cercanas. Si continuamos echando a andar el tiempo para atrás, alcanzamos un momento en que las galaxias, hoy tan separadas, comenzarían a tocarse. Finalmente, llegaríamos a un momento en que toda la masa del universo se encontraría concentrada en un volumen relativamente pequeño. Como conocemos la velocidad con que se separan entre sí las galaxias, es posible estimar cuánto tiempo hace desde que se encontraban tan juntas y comprimidas que no tenían identidad propia, puesto que el universo era entonces homogéneo y bien mezclado. El tiempo transcurrido es de alrededor de 15 mil millones de años. Esto suena a mucho, pero hay que recordar que el Sol y el sistema planetario se formaron hace 5 mil millones de años, cuando el universo tenía ya 10 mil millones de años de formado. O sea que el Sol tiene una edad considerable, aproximadamente una tercera parte de la edad del universo.

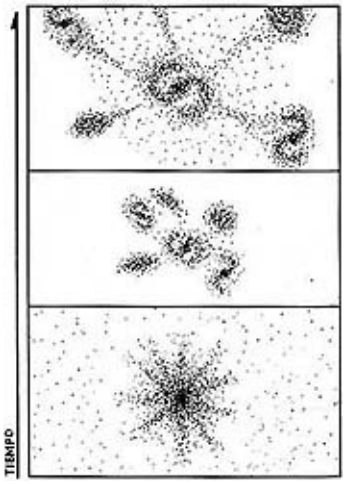
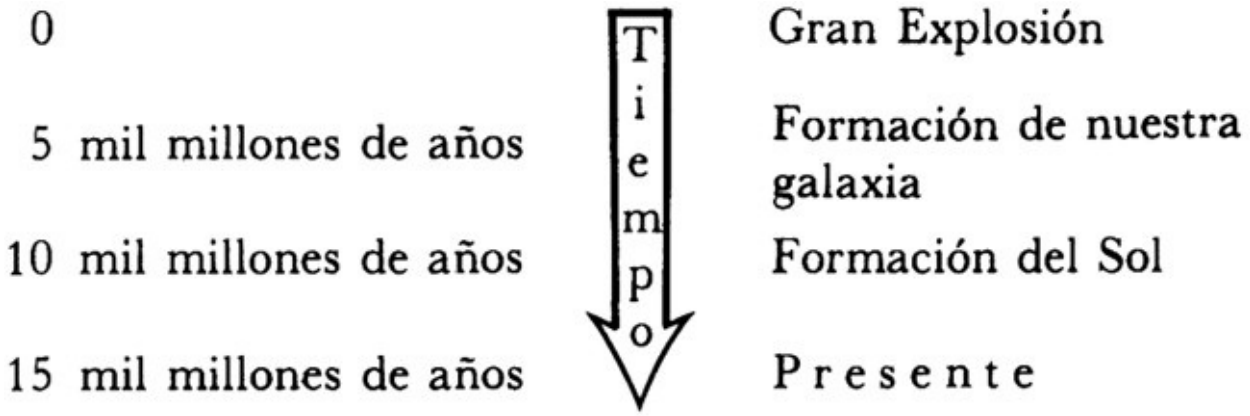


Figura 25. Como el universo se halla en expansión, se concluye que en el pasado era más compacto. Hace quince mil millones de años, todo el universo se hallaba concentrado en una pequeña región de alta densidad y temperatura.

Fue de aquel núcleo primigenio que el universo se originó hace 15 mil millones de años en una violenta explosión. El gas, originalmente muy caliente y homogéneo, fue expandiéndose velozmente. Poco a poco fue enfriándose y de él fueron formándose grumos de gigantescas proporciones. Debido a la atracción gravitacional, estos grumos de gas fueron contrayéndose para formar las galaxias. Este proceso de formación de las galaxias concluyó cinco mil millones de años después de la gran explosión. Una vez formadas las galaxias, entre ellas la nuestra, se inició en cada una el proceso de subdivisión que lleva a la formación de soles individuales. Es conveniente señalar que la historia del universo incluye cuatro momentos muy importantes para nosotros que están separados entre sí por aproximadamente 5 mil millones de años. Estos momentos son:



El último momento marcado sólo tiene de importancia ser nuestro punto de referencia.

Pero la prueba de fuego de una buena teoría es hacer una buena predicción. Las buenas teorías no sólo deben explicar lo que ya se conoce sino deben predecir fenómenos que nuevos experimentos comprobarán.

La teoría de la gran explosión incluía una gran predicción que se pudo comprobar

finalmente hace menos de veinte años. En 1948 el físico de origen ruso, George Gamow, trabajando dentro del marco del modelo de la gran explosión, hizo notar que el intenso calor de la explosión debió haber producido grandes cantidades de radiación electromagnética que debería estar presente en el universo. Gamow también predijo que dicha radiación estaría ahora en la forma de ondas de radio muy débiles. En aquel entonces, las técnicas de detección de ondas de radio no eran lo suficientemente sensitivas para medir dicha radiación. La predicción de Gamow cayó en el olvido.

Afortunadamente, a partir de los años cincuenta se desarrolló vigorosamente la radioastronomía. En lugar de captar y medir luz visible, los radioastrónomos estudian las ondas de radio que emiten ciertos objetos en el universo como los pulsares, los cuasares, y los máseres circunestelares. Son muchas las contribuciones que a la ciencia ha hecho la radioastronomía, tales como el descubrimiento de los tres tipos de objetos mencionados. Pero la contribución más importante sería la detección accidental de la radiación producida por la gran explosión y que Gamow había predicho se podría medir en la forma de ondas de radio.

En 1965 los radioastrónomos estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson utilizaban un radiotelescopio muy sensitivo para medir ondas de radio que pudieran entorpecer la telecomunicación vía satélite. (véase la Fig. 26) Para su desconcierto, encontraron que el sensitivo aparato registraba un exceso de ondas de radio que no podían atribuir a algo conocido. En una conversación informaron de este descubrimiento a un colega, y éste les dio a conocer la predicción de Gamow. La radiación que queda como testimonio de la gran explosión ha sido medida a diferentes frecuencias (véase la Fig. 27) y su intensidad tiene precisamente la forma predicha por el modelo de la gran explosión. Por su descubrimiento, fortuito pero fundamental, Penzias y Wilson compartieron el premio Nobel de Física de 1978.

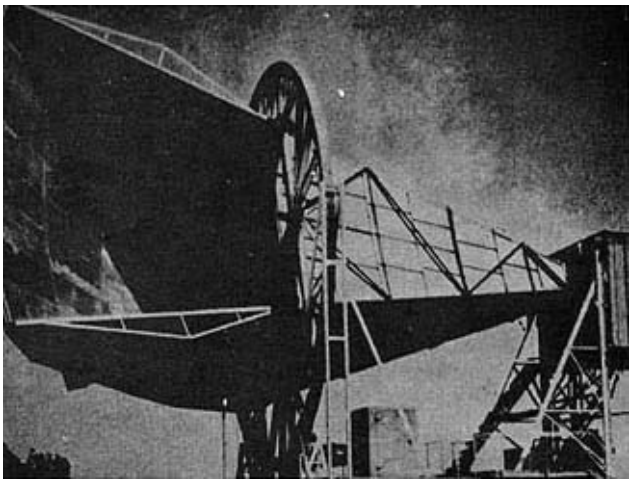


Figura 26. El radiotelescopio con el que Penzias y Wilson detectaron la radiación fósil producto de la gran explosión.

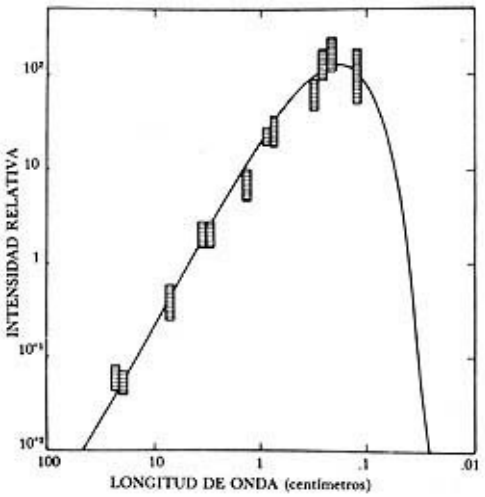


Figura 27. Como lo predice la teoría, la radiación fósil tiene la dependencia espectral de un cuerpo negro a la temperatura de 3 grados absolutos. Por eso se le conoce también como radiación de fondo de 3 grados.

¿Se expandirá el universo por siempre? Su expansión depende de la cantidad de masa que contiene. La fuerza de atracción gravitacional entre las galaxias produce una desaceleración de la expansión. Sin embargo, si la masa del universo está formada sólo por las galaxias, la fuerza de atracción gravitacional nunca logrará detener la expansión y evolucionaremos hacia un universo cada vez más vacío. Por otra parte, si existiera una gran cantidad de materia invisible en el universo, la atracción gravitacional ganaría la batalla y en el futuro lejano la expansión se detendría y de hecho comenzaría el universo a contraerse.

¿Existen estas grandes cantidades de materia invisible? Hasta hace muy poco se creía que no, lo cual parecía condenar al universo a expandirse por siempre. Pero ahora se especula sobre una posible nueva fuente de masa. Durante la gran explosión se produjeron grandes cantidades de partículas físicas llamadas neutrinos. Se creía que éstos, como los fotones, no tenían masa. Pero ciertos experimentos sugieren que el neutrino sí podría tener masa, con lo que estaría contribuyendo a detener la expansión del universo.

IX
Evolución cósmica

Aunque parezca excesivamente ambicioso o casi imposible, la ciencia puede proporcionar un esquema de la evolución del cosmos que se inicia con la gran explosión y llega hasta nuestros tiempos. Este esquema es imperfecto e incluye puntos en los que nuestra comprensión de lo que ocurrió es limitada, pero globalmente tiene una capacidad de predicción notable.

El momento del inicio de nuestro esquema es el menos comprendido. ¿Qué ocurría antes de la gran explosión? No lo sabemos porque la violencia y las altísimas temperaturas borraron toda información de lo que pudo haber antes. Así como al ver un recipiente con hierro fundido no podemos decir si dicho hierro era parte de una silla o de un auto o de una ventana, la gran explosión fue el crisol del cual surgió un universo nuevo, sin memoria.

Pasados unos cuantos minutos de la gran explosión, el proceso de síntesis de los núcleos atómicos se detuvo porque las temperaturas habían descendido a unos 10 mil millones de grados centígrados y dichos procesos sólo se efectúan por encima de esta temperatura. Los únicos átomos que se alcanzaron a formar en gran cantidad fueron los de hidrógeno y helio. El universo continuó expandiéndose y enfriándose.

La composición química del universo quedó pues fijada en hidrógeno y helio. ¿De dónde provienen el carbono, el oxígeno, el calcio, etcétera, que componen a la Tierra, que forman parte de nosotros? Pasarían algunos miles de millones de años antes que la naturaleza los produjera.

Alrededor del millón de años de la gran explosión, el universo estaba relativamente frío, como a 1 000 grados centígrados. Esto redujo la tendencia de cualquier homogeneidad a expandirse individualmente, y permitió a la fuerza de gravedad hacer su trabajo de contracción. Estos grumos o inhomogeneidades, aun cuando seguían participando en la expansión del universo, individualmente se contraían (véase la Fig. 28). Cada grumo daría lugar a una galaxia. Como a los 5 mil millones de años de la gran explosión, la contracción de las galaxias se hallaba estabilizada y, en el gas que las formaba, comenzó a producirse la formación de estrellas.

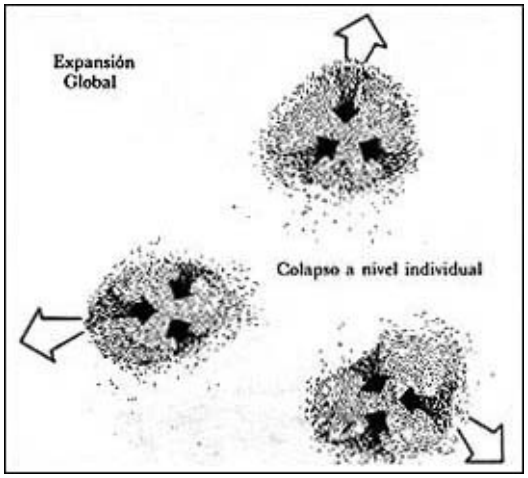


Figura 28. Aun cuando el universo continuaba expandiéndose, cada protogalaxia considerada individualmente se comenzó a contraer.

Afortunadamente, nuestro Sol no formó parte de aquella primera generación de estrellas porque como sólo había disponible hidrógeno y helio, no pudieron formarse planetas de superficie sólida como la Tierra. Después, como si hubiera una conspiración cósmica para que apareciera vida, las más masivas de las estrellas de aquella primera generación explotaron como supernovas.

Durante la explosión de una supernova se vuelven a dar las condiciones físicas extremas que permiten la síntesis de núcleos sencillos como el hidrógeno y el helio en núcleos más complejos como el carbono, el oxígeno, el fósforo, el hierro, etcétera. Así, con su muerte, estas estrellas «abonaron» el gas a su alrededor y permitieron que las siguientes generaciones estelares pudieran tener los elementos químicos necesarios para formar planetas del tipo de la Tierra y, en ellos, quizá vida.

Es realmente asombroso pensar que el oxígeno que forma parte de nuestra sangre, el calcio que forma parte de nuestros huesos, así como todos los elementos químicos que nos forman han estado involucrados en dos explosiones: una hace 15 mil millones de años, la gran explosión, y otra más modesta, y relativamente más reciente, necesaria para completar la lista de elementos químicos indispensables para el surgimiento de la vida. La explosión tipo supernova que proporcionó los elementos faltantes pudo además, haber ayudado al colapso gravitacional que formó al Sol. Las nubes moleculares de las cuales nacen las estrellas se hallan en un equilibrio precario y ciertos estudios sugieren que una explosión de supernova causó el «empujoncito» necesario para que se colapsara la nube de la que se formó el Sol.

Independientemente de si fue ayudado o no por una supernova, el colapso gravitacional del que se formó el Sol ocurrió hace como 5 mil millones de años. Esto se sabe, entre otra cosas, gracias al estudio llamado de fechamiento de meteoritos. Una vez formado el Sol y el Sistema Solar, las primeras formas elementales de vida aparecen relativamente pronto. Las formas de vida más antiguas que se han encontrado tienen tres mil quinientos millones de años. Pero la vida inteligente tarda

mucho más en aparecer. Los homínidos más antiguos tienen sólo unos dos millones de años. El ser humano sólo ha estado presente en el universo en la última diezmilésima parte de su historia.

Pero gracias precisamente a su inteligencia, es capaz de comprender lo que ocurrió en las anteriores nueve mil novecientas noventa y nueve diezmilésimas de la historia. Como parte de su evolución, el universo ha formado un ser que lo contempla y trata de entenderlo.

X
Las astronomías invisbles

El ser humano ha aprendido mucho del universo aun cuando sólo ha estado físicamente presente en una muy pequeña parte de su historia. Esto ha sido posible gracias a un fenómeno físico maravilloso: la luz.

Los astros emiten luz que el astrónomo capta y estudia con sus telescopios e instrumentos. Sin tener en sus manos una muestra del astro estudiado, el científico puede averiguar su temperatura, su densidad, su composición química, todo gracias a la luz. La explicación a este aparente milagro es que la luz nos trae información muy precisa sobre las condiciones físicas del cuerpo que la emitió. Por ejemplo, conforme un metal es calentado a mayores temperaturas, su color pasa de rojo a amarillo. Un técnico experimentado puede estimar la temperatura de un metal con sólo ver el color de la luz que emite.

Basado en los mismos principios, un astrónomo puede estimar la temperatura de una estrella a partir de su color. El Sol, de color amarillo, tiene una temperatura de 6 000 grados absolutos en su superficie. En cambio, la rojiza Betelgeuse tiene una temperatura superficial de aproximadamente 3 000 grados y el tono azulado de Rigel implica una superficie más caliente, a unos 12 000 grados.

Por supuesto, el análisis de la luz proveniente de los astros se hace de manera más rigurosa y cuantitativa. Mediante los instrumentos adecuados, el rayo de luz es descompuesto en sus colores básicos formando el espectro de la estrella. La intensidad relativa de estos colores entre sí nos dice qué temperatura tiene la estrella estudiada. La presencia de «rayas» espectrales (bandas oscuras en el espectro) en sitios bien determinados revela la presencia de elementos químicos. Este tipo de estudios ha avanzado tanto que se dice, sin exageración, que conocemos mejor la composición química de la superficie de las estrellas que la del interior de la Tierra.

El estudio de la luz ha sido a través del tiempo la herramienta principal para conocer mejor al universo. Pero esto no es todo. La naturaleza guardaba una agradable sorpresa que comenzó a develarse a fines del siglo pasado. Dicho de manera muy breve existen otras formas de «luz», otras radiaciones que el ojo no puede captar pero que pueden estudiarse con los aparatos adecuados. Estas radiaciones invisibles traen, como la luz, importante información sobre las características del objeto que las emitió.

La radiación que nosotros llamamos luz, junto con las otras radiaciones invisibles, forman parte del fenómeno llamado radiación electromagnética. Esta radiación está constituida por fotones. Cuando los fotones tienen un tamaño (o longitud de onda) de entre 0.3 y 0.7 micras, el ojo humano los puede detectar. Si tienen longitud de onda mayor o menor pasan desapercibidos. Los fotones a los que el ojo humano es sensible

tienen longitudes de onda muy pequeños (una micra es una millonésima de metro).

Tomando en cuenta su longitud de onda, se acostumbra dividir a la radiación electromagnética en seis partes, que mostramos en la Figura 29. La parte visible del espectro es la más familiar para nosotros, pero las otras radiaciones se presentan cada vez más en nuestra vida diaria. Veamos algunos ejemplos. Las útiles ondas de radio se usan para comunicaciones de todo tipo. También son las empleadas en los hornos de microondas para calentar alimentos de manera muy rápida. Los rayos X son otra forma útil de la radiación electromagnética con sus diversas aplicaciones médicas.

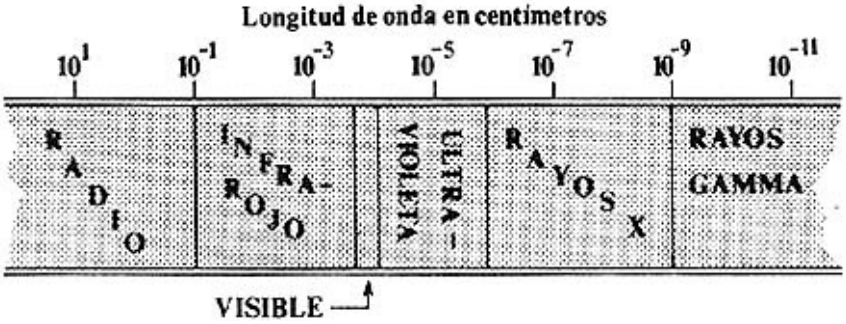


Figura 29. El espectro electromagnético se divide en seis regiones, de acuerdo a la longitud de onda de los fotones que constituyen la radiación.

Lo que quisiéramos enfatizar en el marco de la astronomía es que todas estas radiaciones son, en cierto modo, como colores invisibles. Obedecen las mismas leyes físicas que la luz (por supuesto, toda radiación electromagnética viaja a la velocidad de la luz) y como ella, nos informan sobre el objeto que las emitió.

¿Emiten los diversos cuerpos cósmicos las otras radiaciones además de la luz? Por supuesto que sí. El Sol emite la mayor parte de su energía en forma de luz, pero también emite en menor grado las otras radiaciones. No fue fácil averiguar esto. Para detectar las radiaciones invisibles es necesario construir un detector especial muy sensitivo. Estos detectores sólo han podido construirse en las últimas décadas. Mas aún, la atmósfera de la Tierra es transparente sólo a algunas de las radiaciones (véase la Figura 30) y fue necesario utilizar aviones, globos y más recientemente satélites (véase la Figura 31) para estudiarlas. Volviendo al Sol, su imagen hecha a partir de los rayos X que emite es muy diferente a la imagen que estamos acostumbrados a ver (véase la Figura 32).

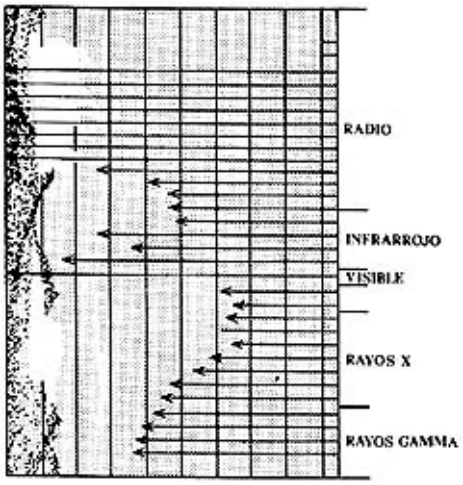


Figura 30. Las diversas radiaciones que forman el espectro electromagnético tienen distintos grados de penetración en nuestra atmósfera. Sólo la radiación visible (luz) y la radiación de radio llegan fácilmente hasta la superficie de la tierra.

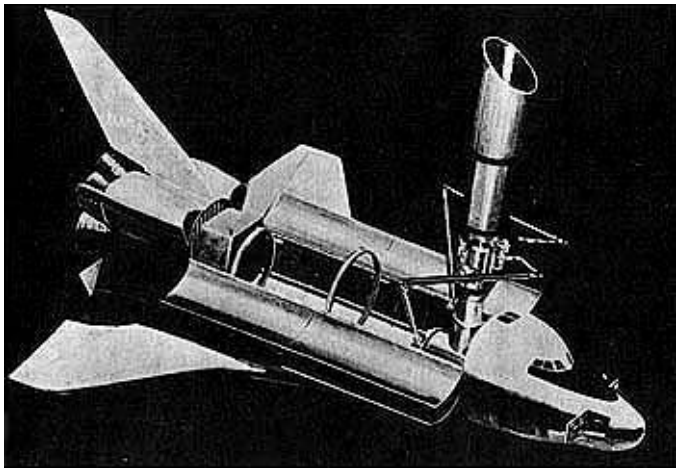


Figura 31. En este dibujo el transbordador espacial de los EUA coloca en órbita a un satélite astronómico.

Figura 32. Esta imagen del Sol, hecha a partir de su emisión de rayos X, nos muestra una estructura muy diferente a la que puede verse en las fotografías tomadas a partir de su radiación visible.

Como en el ejemplo del Sol, las astronomías invisibles pueden complementar y enriquecer nuestra comprensión de objetos ya conocidos pero su real valía se hizo

evidente al dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿existirían fenómenos en el universo que no emitiesen luz, pero sí otra de las radiaciones, y que por lo tanto hubiesen permanecido invisibles aun al mejor de los telescopios? La respuesta es que sí, que son muchos los fenómenos que habían permanecido invisibles. Cada una de las cinco astronomías invisibles ha aportado el descubrimiento de fenómenos que han estado ocurriendo desde hace miles de millones de años, pero que nosotros conocemos hace unos cuantos. Algunos ejemplos de estos fenómenos invisibles son los pulsares, la radiación cósmica de fondo, y los discos de acreción en sistemas binarios de estrellas.

El cielo se vería muy diferente si nuestros ojos pudiesen captar otra radiación en lugar de la visible. Para ejemplificar esto, hemos marcado en los mapas respectivos los cinco objetos más brillantes en ondas de radio, en el visible, y en rayos X (véase la Figura 33). Los mapas son totalmente distintos. Mientras el cielo visible está dominado por las familiares estrellas, el cielo en ondas de radio está dominado por remanentes de supernova y radiogalaxias, y el de rayos X por sistemas binarios de estrellas. En la actualidad, se estudia al universo en todas las ondas electromagnéticas.

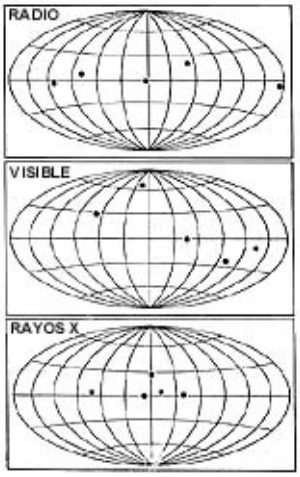


Figura 33. En estos tres mapas mostramos los cinco objetos más brillantes del cielo en ondas de radio (arriba), en luz visible (centro) y en rayos X (abajo). Si nuestros ojos fueran sensibles a las distintas radiaciones de la luz, veríamos un universo muy diferente.

XI
La influencia de la astronomía sobre el desarrollo tecnológico

La razón de ser de la astronomía es la búsqueda de un conocimiento, cada vez mejor, de cómo es el universo. El valor cultural de esta búsqueda es muy grande. Es parte del instinto humano el acumular información sobre la naturaleza, y esta acumulación de conocimientos nos ha permitido aprovechar los recursos de nuestro medio ambiente. Pero aun cuando no veamos en ello una utilidad obvia, la curiosidad persiste y nos lleva a estudiar temas que no tienen una relación directa (al menos aparentemente) con nuestras necesidades para vivir mejor. La experiencia demuestra que los conocimientos científicos aparentemente más alejados de lo cotidiano pueden, después de un cierto tiempo, cambiar a fondo precisamente a lo cotidiano. Existen muchos ejemplos de esta influencia de la ciencia, en nuestro caso de la astronomía, sobre el desarrollo tecnológico.

La civilización griega tuvo gran interés en hacer mapas del cielo, en catalogar a las estrellas y a las constelaciones. Quizá comenzaron a hacerlo principalmente por curiosidad pero pronto quedó claro que el conocer el cielo era crucial para una actividad importantísima: la navegación. De hecho, existe evidencia de que ya los polinesios viajaban de isla en isla guiándose por el Sol y las estrellas. Las grandes expediciones que caracterizaron al pasado no hubieran sido posibles sin un buen conocimiento del cielo. Un buen navegante podía establecer la posición de su buque en el mar aun en condiciones de cielo parcialmente nublado. A través de los huecos entre las nubes buscaban alguna estrella, la cual reconocían por su color y brillo y a partir de su posición en el cielo podían estimar sus coordenadas. Aun en nuestros tiempos, una buena parte del comercio internacional se realiza por mar y hasta principios de nuestro siglo XX la navegación dependió del conocimiento del cielo. Por supuesto, en la actualidad la determinación de la posición de una nave se hace con técnicas muy sofisticadas, en ocasiones valiéndose de los satélites que se han puesto en órbita para ayudar a la navegación y procesando las señales recibidas mediante una computadora.

Ya que hablamos de satélites artificiales, tan importantes en la tecnología contemporánea, es necesario recordar que los fundamentos teóricos de su movimiento provienen de la astronomía. El prodigioso científico británico Isaac Newton desarrolló las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los satélites artificiales en su interés por comprender los movimientos de nuestro satélite natural, la Luna. Seguramente no se imaginó Newton la importancia que los satélites tendrían en nuestra vida. Ahora las transmisiones de televisión, la comunicación telefónica entre continentes, el apoyo a la navegación marítima y aérea y otras actividades, se realizan

utilizando satélites. También existen satélites que continuamente observan la Tierra para informarnos sobre nuestra situación meteorológica, geológica, e inclusive agrícola. Y todo esto se inició porque Newton quiso entender por qué la Luna orbitaba alrededor de la Tierra.

La astronomía tiene requerimientos técnicos muy apremiantes. Requerimos de telescopios y radiotelescopios cada vez más grandes y también más precisos. La tecnología de alta calidad en áreas como la óptica, la mecánica y la electrónica, se ha desarrollado en buena parte gracias al acicate de la astronomía. Luego estos conocimientos se traducen en mejores maquinarias y mejores instrumentos. Entonces, de nuevo la astronomía planteará un proyecto, un requerimiento que va más allá de lo que necesita la industria. Y de nuevo se iniciará este ciclo beneficioso tanto para la astronomía como para la tecnología.

Veamos otros ejemplos. El óptico francés Henri Chrétien desarrolló durante su vida importantes diseños ópticos que mejoraron la calidad de los telescopios y de los instrumentos que se usan en la astronomía. Existe un diseño de telescopio llamado del tipo Ritchey-Chrétien que fue inventado por el óptico francés y por el astrónomo estadounidense George Ritchey. El mayor telescopio con que cuenta México, con espejo principal de 2.1 metros de diámetro, está construido de acuerdo con el diseño Ritchey-Chrétien, y está ubicado en la Sierra de San Pedro Mártir, en Baja California Norte. El telescopio espacial (llamado telescopio Hubble en honor al hombre que descubrió la expansión del universo) que será puesto en órbita en los años próximos por los Estados Unidos también tiene óptica Ritchey-Chrétien. Gracias a la amplia experiencia que había acumulado Chrétien construyendo telescopios, pudo resolver un problema muy importante de la cinematografía. En las décadas de los cuarentas y cincuentas el cine comenzó a enfrentar la competencia de la televisión y a perder público. Como una nueva manera de atraer audiencias, los magnates del cine comenzaron a buscar alguna novedad que le añadiera atractivo a la proyección de películas. Finalmente, encontraron que años atrás Chrétien había inventado un sistema óptico que permitía filmar y proyectar imágenes dos y media veces más anchas que las del cine convencional. Este proceso de filmación y proyección fue comprado a Chrétien y bautizado con un nombre muy familiar: ¡El Cinemascope! La introducción de este proceso de pantalla ancha fue muy exitoso y permitió la recuperación de público.

Conozco la historia de Chrétien en detalle por una afortunada situación. Los herederos de Chrétien (que dejó una jugosa herencia gracias a su descubrimiento del Cinemascope) decidieron crear un premio con su nombre para ser otorgado a astrónomos observacionales jóvenes. En 1984 tuve el alto honor de recibir este premio y fue cuando me adentré en la biografía de Chrétien, encontrando que además de sus diseños astronómicos que ya conocía, había inventado el Cinemascope.

Recuerdo que de niño fui a ver la película *El manto sagrado*, quizá atraído por la publicidad: era la primera película filmada en Cinemascope. Ignoraba entonces que muchos años después mi vida se iba a volver a ver influenciada por la figura extraordinaria de Henri Chrétien.

La investigación astronómica también ha tenido mucho que ver con la investigación del proceso llamado fusión nuclear, el cual se espera resolverá los problemas energéticos de la humanidad en el siglo XXI. La fusión nuclear ocurre en el interior de las estrellas y si la pudiéramos producir y controlar en la Tierra tendríamos una fuente de energía «limpia» (sin los problemas de desechos radiactivos que presenta la fusión nuclear en el proceso que se emplea actualmente en las plantas nucleares) y prácticamente inagotable.

Cuando veo los reducidos presupuestos que existen para la investigación astronómica en nuestro país, me pongo a buscar nuevos ejemplos en que la astronomía beneficia a la tecnología. Quizá con muchos ejemplos puedan nuestras más altas autoridades entender que es importante apoyar a la ciencia básica, apoyar a la astronomía. También en nuestro país se han dado ejemplos en que la astronomía ha beneficiado a la tecnología. Hace algunos años, una empresa estaba muy interesada en computarizar maquinaria, o sea en lograr que un equipo realizara una serie de maniobras programadas por computadora y que se llevaran a cabo sin asistencia de un operador humano. Esta empresa encontró que el único sitio en México que podía resolverles su problema era el Laboratorio de Electrónica de nuestro Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México. El proyecto se concluyó satisfactoriamente y la empresa pudo poner en el mercado maquinaria computarizada diseñada en México. ¿Cómo pudieron los electrónicos de nuestro Instituto realizar esta tarea? La respuesta es sencilla. Por muchos años habían estado diseñando y construyendo telescopios que se mueven guiados por una computadora. Para ellos fue relativamente fácil adaptar sus sólidos conocimientos de los telescopios a las maquinarias.

Pero, aquí entre nos, aun cuando estas aplicaciones tecnológicas son buenas y nos ayudan a justificar nuestra existencia ante la insensible burocracia, insisto en que no son el propósito fundamental de la astronomía. Queremos conocer mejor al universo, independientemente de si hay un beneficio material para la humanidad o no.

XII
Una experiencia personal

Muy frecuentemente ofrezco pláticas de divulgación sobre diversos temas astronómicos, dirigidas al público en general pues una de nuestras obligaciones es comunicar al público qué ocurre en la astronomía nacional y en la internacional. Cuando en el público hay estudiantes, es común que al final de la conferencia me pregunten cómo podrían llegar a ser astrónomos.

¿Cómo se hace un astrónomo? Aparte de mucha dedicación y empeño, debe uno realizar una secuencia de estudios bastante prolongados. Restringiré mi exposición al caso de un astrónomo mexicano típico, caso en el que quedo incluido.

Después de terminar la Preparatoria, la mayoría de nosotros hemos realizado la licenciatura de Física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Una vez concluidos los estudios, que nos proporcionaron una preparación en física y matemáticas, comienza propiamente la especialización en astronomía. Para obtener la licenciatura en física es necesario realizar una tesis, o sea un trabajo en que uno revisa (en algunos casos afortunados, investiga) un tema con cierto detalle y profundidad. Si uno está interesado en la astronomía, resultará lógico que esta tesis verse sobre un tema astronómico. En mi caso, yo tuve la suerte de que fuera mi directora de tesis la doctora Silvia Torres de Peimbert, uno de los miembros más destacados del personal de investigación del Instituto de Astronomía. El tema de mi tesis fue el estudio de las nebulosas planetarias. Estos objetos son nubes de gas en expansión, puesto que fueron eyectadas hacia el espacio circundante por una estrella vieja.

El paso entre resolver los problemas planteados en los libros de texto y encarar un problema de investigación, representó un salto cuántico para mí, ya que en el primer caso se cuenta con la información proporcionada en el mismo libro y la investigación requiere que busquemos en muchas fuentes y, en ocasiones, tengamos que proponer algo nuevo.

Terminada la licenciatura la persona no se halla aún capacitada para hacer investigación (salvo los casos excepcionales de personas que a veces ni licenciatura tenían y que fueron, sin embargo, exitosos investigadores) por lo que es necesario realizar un doctorado en astronomía. Ya es posible realizar estos estudios en México, pero cuando yo concluí la licenciatura (1973) no existía esta posibilidad y realizaba uno el doctorado en el extranjero, generalmente en los Estados Unidos o en algún país europeo. Nuevamente asesorado por la doctora Torres de Peimbert, logré que me aceptaran en la Universidad de Harvard, ubicada en Cambridge, Massachusetts, en el noreste de los Estados Unidos.

Al iniciar mis estudios de doctorado volví a experimentar un cambio brusco

respecto a lo que estaba acostumbrado. El paso de trabajo era mucho más intenso. En lugar de conspirar todos juntos contra el profesor, los estudiantes competían ferozmente entre ellos por las mejores calificaciones. Tuve que comenzar a estudiar día y noche. Afortunadamente, mi empeño tuvo frutos y transcurridos dos años había yo concluido el pesado programa de cursos de astronomía y física. Tenía que comenzar a escoger un tema para mi tesis doctoral.

En México, la mayoría de mi experiencia astronómica había tenido que ver con la astronomía que se realiza en la región visible del espectro electromagnético, o sea la luz. Durante mi estancia en Harvard me había yo percatado de que la astronomía era mucho más de lo que dominábamos en México; se estaba estudiando al universo ya no sólo mediante la luz de los astros, sino captando sus ondas de radio, sus rayos X, su radiación infrarroja, entre otras formas de radiación. Por esto pensé que aportaría más a la astronomía mexicana si me especializaba en una de estas nuevas astronomías que captaban radiaciones invisibles y que permitían estudiar nuevos fenómenos y objetos cósmicos, por lo que decidí convertirme en un radioastrónomo.

Con la ayuda de los doctores Eric J. Chaisson, que dirigió mi tesis doctoral; y de James M. Moran, que me introdujo a las poderosas técnicas de la interferometría radioastronómica, comencé a concentrarme en la radioastronomía. Me fascinaba particularmente el hecho de que mediante la radioastronomía, iba yo a poder «observar» el centro de nuestra galaxia, el centro de la Vía Láctea. Esta región había permanecido oculta a los astrónomos porque el polvo cósmico que existe en el espacio es opaco a la luz y no permite que ésta al salir del centro de la Vía Láctea llegue a nosotros. Sin embargo, este polvo cósmico es transparente a las ondas de radio. En el centro de la Vía Láctea se producen, por procesos naturales, ondas de radio que sí se pueden detectar en la Tierra.

Finalmente, en 1976 partí a Green Bank, Virginia Occidental, a realizar mi primer experimento de observación radioastronómica. El instrumento que iba a utilizar era el imponente radiotelescopio con plato de 42 metros de diámetro del Observatorio Radioastronómico de los Estados Unidos (ver Figura 34). Nervioso, preparaba yo el programa de observación en el cuarto de la consola de mando. El operador del radiotelescopio esperaba a que yo le entregara dicho programa escuchando música en un pequeño receptor que había traído. Francamente, me sentía inseguro y dudaba de la relevancia y el éxito del programa que iba a iniciar. ¿Podría remontar las limitaciones y deficiencias de mi preparación, la cual había ocurrido en ambientes en que la alta tecnología estaba prácticamente ausente? Pensé que estaría yo más tranquilo en mi nativa Mérida, atendiendo una tienda. Pero del receptor que estaba asentado sobre la consola comenzó a surgir una melodía conocida. Se trataba de una composición de mi paisano Armando Manzanero, cuyas canciones han recorrido el mundo. Pensé que si un compositor de mi tierra había tenido tanto éxito ahí y en

todas partes, no había razón para que un radioastrónomo se desempeñara al menos dignamente. Me puse de pie y con paso firme me dirigí, programa en mano, al operador del radiotelescopio.

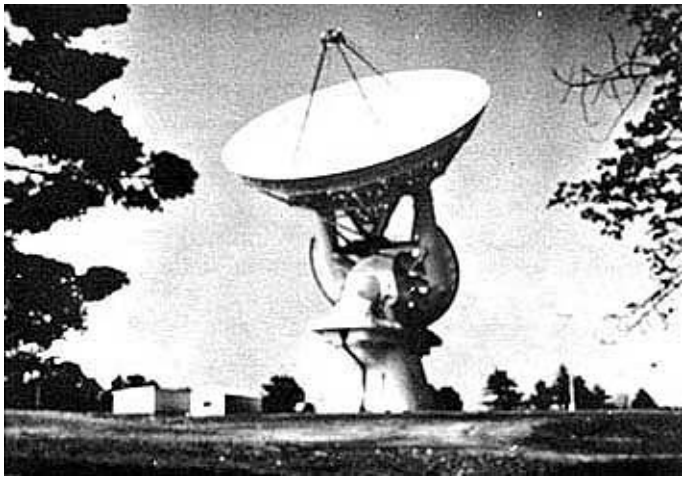


Figura 34. El radiotelescopio con plato de 42 metros de diámetro del Observatorio Radioastronómico Nacional de los EUA.

Dos años y varios radiotelescopios después concluí mi tesis doctoral que presenta un estudio sobre el núcleo de la Vía Láctea. En dicha tesis presenté evidencia observacional que favorecía la teoría de que ahí residía un hoyo negro supermasivo. La tesis fue aceptada y recibí el doctorado en astronomía de la Universidad de Harvard. En 1980 mi tesis recibió el premio Robert J. Trumpler de la Astronomical Society of the Pacific, el cual se entrega anualmente a la mejor tesis de astronomía realizada en América del Norte.

De nuevo mi persona volvió a sufrir una sacudida al regresar a México a trabajar en el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México. En lo científico, nuestro medio está mucho más limitado. Los grandes recursos económicos de los que se dispone en Estados Unidos son inexistentes en México. En particular, no contamos con un radiotelescopio, por lo cual tengo que viajar frecuentemente al extranjero para usarlos. Más aún, estos viajes los tengo que subsidiar parcialmente de mi bolsillo, porque el apoyo económico para viajar con que contamos es también muy reducido.

La situación ha empeorado con la crisis que vive nuestro país. Los astrónomos mexicanos continuamos trabajando entusiastamente, pero siempre con la preocupación diaria de ver que nuestra ciencia, y de hecho todas las ciencias, no reciben en nuestro país el apoyo que necesitan. Aún con estas dificultades, continúo recomendando a la gente joven que haga una carrera en las ciencias.

XIII
Vida inteligente en el universo

¿Estamos solos en el universo? Desde muy remotos tiempos el ser humano se ha preguntado sobre la posibilidad de que exista vida inteligente en otros mundos. La mayor parte del tiempo, esta interrogante ha sido considerada en contextos filosóficos o religiosos. Sin embargo, el desarrollo reciente de la astronomía ha permitido comenzar a buscar una respuesta sobre bases científicas.

Tito Lucrecio Caro, un contemporáneo y compatriota de Julio César, se refirió a la posibilidad de la existencia de otros mundos en su famoso poema *De rerum natura* (Sobre la naturaleza de las cosas). Lucrecio especulaba que:

> *En primer lugar, en todas partes alrededor de nosotros, a los lados, arriba y abajo no hay fin. Ya he mencionado esto antes, esta verdad se proclama a sí misma y la naturaleza del vasto espacio la hace evidente. Y puesto que el espacio infinito se extiende en todas direcciones y los átomos en número y cantidad incalculables viajan en todas direcciones apurados por su movimiento eterno, de ninguna manera puede considerarse probable que sea esta la única Tierra creada, y que todos esos átomos estén ahí sin hacer nada.*

Las cavilaciones de Lucrecio se extendieron hasta proponer que la vida podría aparecer en estos otros mundos:

> *Más aún, cuando hay una abundancia de materia disponible, cuando hay el espacio vacante, y cuando no hay razón que retrase el proceso, entonces las formas de la realidad deben combinarse y crearse. Hay una enorme cantidad de átomos disponibles, tantos que no habría tiempo para contarlos en toda la eternidad y hay una fuerza que lleva a los átomos a diversos sitios así como los trajo a este mundo. Así que debemos reconocer que hay otros mundos en otras partes del universo, con razas de hombres y animales diferentes.*

Las ideas de Tito Lucrecio Caro carecían de una base científica sólida de observación y experimentación. Más bien eran una serie de concepciones filosóficas hilvanadas de manera atractiva y convincente.

La siguiente figura histórica que consideraremos nació más de 1 600 años después del romano Lucrecio. Giordano Bruno fue un monje dominico que se opuso radicalmente a los pensamientos religiosos de su época. Bruno era un creyente de la teoría copernicana, que sacaba a la Tierra de su sitio privilegiado en el universo y la

convertía en un planeta más del Sol. En su *Tercer diálogo* «Sobre el universo infinito y sus mundos», Bruno hacía a su personaje protagonista, Francastorio, afirmar que había otros mundos habitados como el nuestro. Por sus puntos de vista heréticos, entre ellos la existencia de otros mundos habitados, Giordano Bruno fue encarcelado por la Santa Inquisición. Cuando rehusó retractarse de sus puntos de vista, fue condenado a la hoguera. La sentencia se llevó a cabo el 17 de febrero de 1600.

A través de los siglos ha continuado habiendo filósofos y pensadores que conjeturaron sobre la posibilidad de la existencia de vida extraterrestre. Paralelamente a estos ejercicios filosóficos, la ciencia comenzó a tratar de entender qué es la vida y si ésta podría darse en otros sitios del universo.

Simon Newcomb, un astrónomo estadounidense de fines del siglo pasado y principios de éste, pensaba que la vida en la Tierra parecía llenar todos los nichos posibles, puesto que sólo estaba ausente en los sitios de hielos perpetuos o en aquellos donde la temperatura estaba cercana al punto de ebullición del agua. Según él, mientras el agua pudiera permanecer líquida, o sea que no hubiese demasiado frío o calor, la vida era la regla. Newcomb también consideró la posibilidad de que hubiese vida en la Luna o en los planetas del Sistema Solar. Para el caso de la Luna su diagnóstico era negativo:

> *En el caso de la Luna, puesto que es el cuerpo celeste más cercano a nosotros, nos podemos pronunciar de manera más definitiva. Sabemos no existen en la Luna suficiente agua o aire para ser detectados por nuestros experimentos más sensitivos. Es seguro que la atmósfera de la Luna, si es que existe, tiene una densidad menor a una milésima de la densidad de la atmósfera terrestre. Este vacío es menor que el que una bomba de aire ordinaria puede producir. Nos es difícil aceptar que una cantidad tan pequeña de aire le pueda servir de algo a la vida; un animal que sobreviva con tan poco, podría hacerlo con nada.*
>
> *Pero la prueba de la ausencia de la vida en la Luna es aún mayor cuando consideramos el resultado de las observaciones telescópicas. Un objeto del tamaño de un edificio grande podría detectarse en la Luna. Si hubiese vegetación presente en su superficie, podríamos ver los cambios que sufriría en el transcurso de un mes lunar, durante el cual la superficie de la Luna pasa, de estar expuesta a los rayos directos del Sol, al frío intenso del espacio.*
>
> *En tiempos recientes no sólo hemos observado a la Luna con el telescopio, sino que hemos obtenido información más definitiva con la fotografía. La superficie visible ha sido fotografiada repetidas veces bajo las mejores condiciones. No se ha establecido con certeza ningún cambio, ni las*

fotografías muestran la menor diferencia en estructura o tono que pudiese atribuirse a ciudades o a otros trabajos de una raza inteligente. Al parecer la superficie de nuestro satélite está tan completamente carente de vida como la lava fresca del Vesubio.

Las conclusiones de Newcomb eran notables, sobre todo si tomamos en cuenta que fueron hechas en 1905. Estas ideas fueron, como sabemos, confirmadas por el programa espacial de los EUA que estudió en detalle a la Luna. Respecto a los planetas del Sistema Solar, Newcomb pensaba que con la posible excepción de Venus y Marte, no había posibilidad de vida. Mercurio es demasiado caliente y los planetas más externos demasiado fríos.

Desde el punto de vista biológico, Darwin había establecido décadas atrás que la vida evolucionaba en respuesta a las condiciones del medio ambiente. Sin embargo, su trabajo tuvo poco que ver directamente con el problema del origen de la vida. Hacía falta un mayor conocimiento de la bioquímica para que los científicos comenzaran a especular sobre los procesos a través de los cuales un organismo vivo podría aparecer a partir de combinaciones químicas.

Durante los años veintes de nuestro siglo, aparecieron dos trabajos fundamentales que planteaban un esquema mediante el cual podría haberse originado la vida en la Tierra. Los autores de estos trabajos, que fueron hechos independientemente, fueron el bioquímico soviético Alexander Oparin y el biólogo inglés John B. S. Haldane. En esencia, el razonamiento presentado separadamente por Oparin y Haldane puede describirse como sigue. La atmósfera primitiva de la Tierra no era rica en oxígeno como lo es la actual. En particular, no contenía ozono, una molécula formada a partir de tres átomos de oxígeno. El ozono que existe en la atmósfera actual detiene en las capas superiores atmosféricas a la radiación ultravioleta del Sol, la cual es capaz de activar químicamente a la materia. Como la atmósfera primitiva de la Tierra no tenía ozono, la radiación ultravioleta del Sol podía llegar hasta la superficie terrestre. Se sabe que cuando la radiación ultravioleta actúa sobre una mezcla de agua, bióxido de carbón y amoniaco, se producen una gran variedad de substancias orgánicas, incluyendo azúcares y aparentemente algunas de las substancias que forman a las proteínas. De estas proteínas se formarían, supuestamente, grandes moléculas capaces de replicarse y de algún modo, de éstas se llegaría a los primeros organismos unicelulares. Esta secuencia especulativa de eventos no ha sido comprobada en el laboratorio en su totalidad. Sin embargo, los experimentos realizados por Stanley L. Miller y Harold C. Urey en la Universidad de Chicago a principios de los cincuentas indican que al menos los primeros pasos del origen de la vida pueden reproducirse en el laboratorio. Miller y Urey tomaron una mezcla de hidrógeno, metano, amoniaco y agua (todos estos componentes en forma gaseosa) y le hicieron pasar descargas

eléctricas para simular las condiciones que se cree existieron en la Tierra primitiva. Obtuvieron que de este experimento se producían compuestos más complejos, en particular aminoácidos que son los bloques de los que se forman las proteínas. Por desgracia, el paso de los aminoácidos a las células es gigantesco y su duplicación en el laboratorio aún no ha sido lograda.

De cualquier manera los experimentos de Miller y Urey sugieren que la aparición de la vida es un fenómeno natural que se da si hay las condiciones propicias. Otra indicación de que la vida es un proceso natural nos la da la composición química del universo. Los seis elementos químicos más abundantes del universo son el hidrógeno, el helio, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el neón. El helio y el neón forman parte de los llamados gases nobles, o sea que no se juntan entre sí o con otros elementos para formar moléculas. Los restantes cuatro elementos hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno son precisamente los más abundantes en la constitución del ser humano. O sea, que nuestra composición química, a grandes rasgos, refleja a la composición del universo.

La búsqueda de vida extraterrestre se ha concentrado en el pasado en nuestros vecinos más cercanos: los otros planetas del Sistema Solar. A principios de siglo, el astrónomo estadounidense Percival Lowell creyó ver canales en la superficie de Marte. Lowell dejó volar desenfrenadamente su imaginación y llegó a proponer que los marcianos utilizaban dichos canales para irrigar al planeta. Ahora sabemos que los canales marcianos son ilusiones ópticas, estructuras producidas por el cerebro humano que tiende a unir marcas y cráteres en líneas rectas. El impacto de las especulaciones de Lowell fue notable. Basta recordar lo que pasó en 1938, cuando se le ocurrió a Orson Welles hacer una dramatización radiofónica de *La guerra de los mundos*, la novela de H. G. Wells. Esta obra narra una invasión marciana a la Tierra y ante la realista presentación miles de radioescuchas abandonaron sus hogares llenos de pánico.

En julio y agosto de 1976 dos naves Vikingo de los Estados Unidos se posaron en la superficie de Marte. Las imágenes que enviaron a la Tierra revelaron un panorama sin evidencia de vida macroscópica. Por supuesto, lo más interesante que hicieron fue tomar muestras de la superficie marciana y realizar experimentos con ellas para buscar vida microscópica. No se encontró evidencia alguna de materia orgánica. Marte parece no tener ninguna forma de vida.

Hasta ahora no se ha encontrado evidencia de vida en nuestro Sistema Solar, aparte de la Tierra. Es pues necesario extender la búsqueda a otros soles, a otros sistemas solares. Pero ¿cómo viajar a través de tan enormes distancias? Ahora no podemos realizar tan prolongadas odiseas. Quizá pudiéramos recibir o enviar señales de algún tipo a través de las vastedades del cosmos.

En 1959 Giuseppe Cocconi y Philip Morrison llegaron a una conclusión

sorprendente. Con la tecnología ya disponible entonces (que se ha seguido mejorando) era posible comunicarse usando ondas de radio con otras estrellas de la galaxia. Para que posibles civilizaciones en los planetas de estas otras estrellas nos pudieran contestar sólo haría falta que tuviesen un desarrollo tecnológico similar al nuestro. En la práctica, el establecer esta comunicación es un problema monumental que ha sido considerado por muchos científicos. Para tratar de detectar señales inteligentes de otra estrella hace falta un radiotelescopio muy sensitivo. Estos existen. Pero ¿hacia cuál de las estrellas apuntamos?, ¿a qué frecuencia sintonizamos nuestro receptor?, ¿qué tipo de mensaje podemos esperar? Los problemas son muchos y una búsqueda cuidadosa requeriría de mucho esfuerzo pero, como Cocconi y Morrison notaron al concluir su artículo; «la probabilidad de éxito es difícil de estimar, pero si no buscamos, esta probabilidad será cero».

Se han hecho algunos intentos para detectar señales de radio de las estrellas más cercanas. Sin embargo, estos esfuerzos no han sido lo suficientemente sostenidos para alcanzar una conclusión. Hasta ahora no se ha detectado ninguna señal de radio extraterrestre que no pueda explicarse como debida a algún fenómeno cósmico inanimado. Afortunadamente, la comunidad astronómica comienza a tomar en serio esta idea y se habla de construir radiotelescopios que se dedicarían exclusivamente a buscar señales inteligentes. La Unión Astronómica Internacional, la cual agrupa a la mayoría de los astrónomos profesionales del mundo, ha creado una comisión para la búsqueda de vida inteligente extraterrestre, con el propósito de que analice y proponga maneras de atacar el problema.

De cualquier modo, la posibilidad de tener éxito en establecer comunicación con otra civilización inteligente en nuestra galaxia depende de cuantas de estas civilizaciones existen. Algunos investigadores aventurados han tratado de estimar este número. El primero en hacerlo fue Frank Drake, de la Universidad de Cornell, y en su honor la ecuación que se emplea para hacer dicha estimación se llama la ecuación de Drake. Básicamente, el cálculo se hace como sigue. Hay 10^{11} estrellas en nuestra galaxia. De este total, aproximadamente una décima parte son parecidas al Sol. Esto nos deja 10^{10} estrellas. Luego se pregunta uno cuántas de estas estrellas tendrán planetas. Posteriormente estima uno en cuantos de estos sistemas planetarios pudo haber aparecido una forma de vida elemental. Así sucesivamente, se puede llegar a estimar cuántos casos de vida inteligente hay en la galaxia. El cálculo está lleno de incertidumbres. Los científicos optimistas, como Carl Sagan, acaban concluyendo que hay 10^6 (¡un millón!) de civilizaciones inteligentes en la galaxia. Los pesimistas, como Sebastian von Horner, concluyen que hay sólo una (nosotros). Basa tal estimación en una suposición que es relevante para la humanidad. Supone que sí se forman frecuentemente civilizaciones inteligentes, pero que éstas, con su desarrollo tecnológico acaban aniquilándose a sí mismas. Así, en un momento dado

del tiempo sólo hay una (o unas pocas) de estas civilizaciones que duran muy poco y son reemplazadas por otra en alguna estrella de la galaxia.

Aun en la estimación optimista de Sagan, la comunicación interestelar es un asunto muy difícil. Sólo una de cada 100 000 estrellas alberga un planeta habitado por una civilización inteligente. Habría que «escuchar» en ondas de radio del orden de 100 000 estrellas para tener una posibilidad razonable de detectar un caso. Más aún, la distancia típica entre estas estrellas seria de varios cientos de años luz, por lo que la comunicación de ida vuelta tomaría unos mil años. ¡Y esto en el caso mas optimista!

XIV
Existo, luego G

Pienso, luego existo. Esta famosa frase del filósofo francés René Descartes es conocida de todos y es uno de los fundamentos de la filosofía moderna. Algunos científicos contemporáneos piensan que uno podría ir más allá y que el hecho de que existimos nos permite explicar el valor de las constantes físicas fundamentales.

¿Qué es una constante física fundamental? Aun cuando la naturaleza es exuberantemente compleja, sabemos que puede ser descrita en términos de unas cuantas leyes relativamente simples. Tomemos uno de los ejemplos más importantes: la ley de la gravitación universal, descubierta por Isaac Newton en el siglo XVII. Esta ley nos dice que si tenemos dos cuerpos con masas *M* y *m*, respectivamente, separados por una distancia *d*, ellos se atraerán con una fuerza *F* dada por:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}\ \frac{M\ m}{d^2}$$

Donde *G* es la constante gravitacional. La ley puede enunciarse también como la aprendimos en la escuela; «dos cuerpos se atraen mutuamente con fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa». Mientras más masivos son los cuerpos, más grande es la fuerza de atracción que entre ellos existe. Por otro lado, mientras mayor es la distancia entre los dos cuerpos, menor es la fuerza de atracción entre ellos (ver Figura 35).

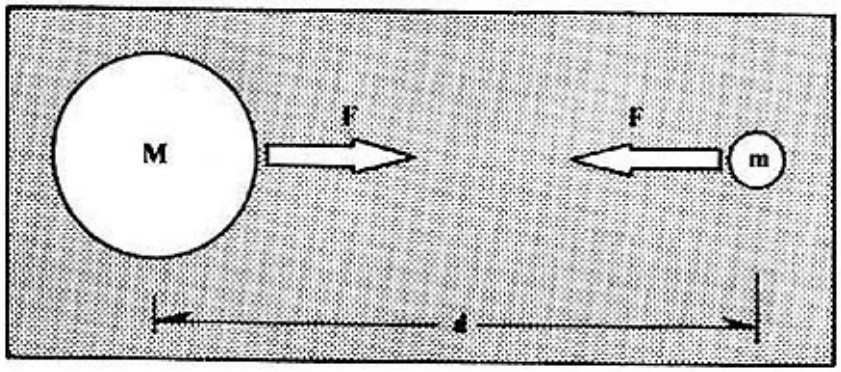


Figura 35. De acuerdo a la ley de la gravitación universal, dos cuerpos se atraen con fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

La ley de la gravitación universal explica, entre otras muchas cosas, el movimiento de los planetas, asteroides y cometas alrededor del Sol. La ecuación anterior tiene una constante de proporcionalidad, *G*, la llamada constante

gravitacional. Experimentos muy precisos han permitido determinar que su valor es 6.67×10^{-8} cm^3 s^{-2} g^{-1}. ¿Por qué tiene este valor? ¿Por qué no la mitad, o el doble o mil veces mayor? Claro, a muchos científicos no les preocupa esto y se lo explican simplemente diciendo que la naturaleza es así y ya.

G es una constante física fundamental. Existen otras constantes físicas fundamentales. Por ejemplo, *c* es la velocidad de la luz (3×10^{10} cm s^{-1} o sea 300 000 kilómetros por segundo), a la cual se mueve la luz en el vacío. La luz es una de las formas que toma la radiación electromagnética y de hecho desde el siglo pasado se sabe que *c* es la velocidad a la que se mueven en el vacío *todas* las radiaciones electromagnéticas, como la luz, las ondas de radio, los rayos X, etc. Otra constante física fundamental es *h*, la constante de Planck, en honor a Max Planck, quien fue uno de los científicos que desarrollaron a principios de siglo la teoría de la mecánica cuántica. La constante de Planck tiene que ver con el tamaño de los átomos y moléculas y con el comportamiento de la materia en escalas muy pequeñas.

Pero regresemos a la ley de la gravitación universal. Esta ley regula la atracción que tienen los cuerpos entre sí. Se cuenta (no se sabe con certeza si en realidad así ocurrió) que Newton vio un día caer una manzana de un árbol. Se preguntó si la fuerza que había hecho caer a la manzana alcanzaría a llegar a objetos más lejanos en particular a la Luna. De algún modo, Newton intuyó que este era el caso y que nuestro satélite natural también era, como la manzana, atraído por la Tierra. ¿Por qué entonces la Luna no había ya chocado con la Tierra, sino que permanecía dando vueltas alrededor de ella? Newton concluyó que la fuerza de atracción gravitacional sí estaba jalando a la Luna, pero como la Luna estaba en movimiento, actuaba sobre ella otra fuerza, la fuerza centrífuga, que balanceaba a la fuerza de atracción gravitacional y permitía a la Luna permanecer en su órbita aproximadamente circular (ver Figura 36). La fuerza centrífuga aparece cuando un cuerpo está en movimiento curvo. Podemos experimentar fácilmente una fuerza centrífuga de la siguiente manera. Tomamos un hilo y en uno de sus extremos atamos una piedra. Si ahora giramos sobre nuestra cabeza dicho hilo, como si se tratara de una honda, sentiremos que la piedra tira de nosotros. Esta es la fuerza centrífuga. Mientras mayor es la velocidad de giro, mayor es esta fuerza.

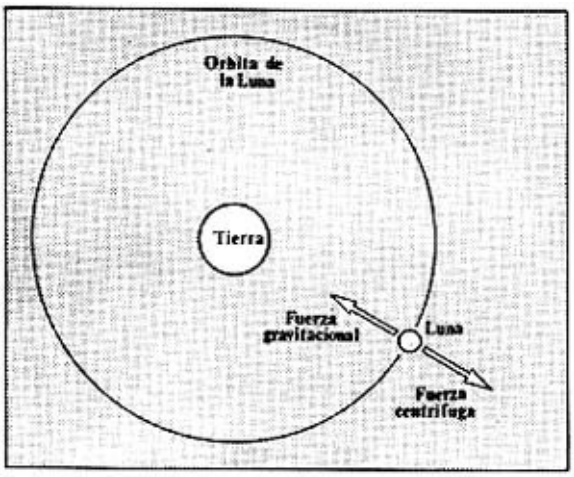


Figura 36. La luna describe una órbita aproximadamente circular alrededor de la tierra. La fuerza de atracción gravitacional queda balanceada por la fuerza centrífuga.

Habiéndose explicado satisfactoriamente Newton por qué la Luna no caía sobre la Tierra pudo entonces proponer que la misma fuerza que actuaba sobre la manzana que había visto caer, estaba actuando también sobre la Luna y de hecho sobre todos los cuerpos del universo. A su vez, estos cuerpos atraían a la Tierra y se atraían entre sí. Posteriormente pudo demostrar que la magnitud de la fuerza gravitacional era directamente proporcional al producto de las masas de los dos cuerpos considerados e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

Habíamos discutido que nuestro universo se encuentra en expansión. Sin embargo, las galaxias se atraen entre sí por la fuerza gravitacional y esta atracción colectiva tiende a disminuir, con el paso del tiempo, la expansión. ¿Qué sucedería si *G*, la constante gravitacional, tuviese un valor distinto? Si *G* fuese mucho mayor de lo que es, el universo hubiese detenido su expansión poco después de la gran explosión y se hubiera vuelto a contraer volviendo a hacerse sumamente denso y caliente. Esto no hubiera dado oportunidad a que se formasen las galaxias y, como parte de las galaxias, las estrellas, en particular una que llamamos Sol. Por lo tanto, no existirían ni la Tierra ni nosotros. O sea que nuestra existencia depende del valor de *G*.

Por otra parte, también podemos considerar qué hubiera pasado si *G* fuese mucho más pequeña de lo que es. Entonces la expansión del universo hubiese ocurrido sin freno alguno y la materia se hubiera extendido tanto y tan rápidamente que no habrían ocurrido, dentro de la expansión, las contracciones de «grumos» que llevaron a la formación de las galaxias. De nuevo, el modificar *G*, en este caso para abajo, tiene consecuencias definitivas sobre nuestra existencia en el universo.

Sabemos que los posibles efectos de una variación en G serían cruciales no tanto en la actualidad sino en los momentos que siguieran a la gran explosión. Se puede demostrar que la gran explosión ocurrió con energía que está exquisitamente balanceada con el valor de *G*. Un pequeño cambio en *G*, ya sea para arriba o para

abajo hubiera hecho evolucionar al universo de una manera muy distinta, de modo que muy probablemente nosotros no existiríamos.

Hay otras coincidencias de este tipo en la naturaleza y en general existe la idea de que si las constantes físicas fundamentales tuviesen valores diferentes no existiría el género humano. Si la masa del electrón fuese un poco menor de lo que es, se sabe que todas las estrellas serían demasiado frías para sostener a la vida en un planeta alrededor de ellas que estuviera a una distancia como la que hay entre el Sol y la Tierra. Si, por otro lado, la masa del electrón fuese algo mayor de lo que es, todas las estrellas serían demasiado calientes.

La única proposición (fuera, por supuesto, de las religiosas) de explicar estas coincidencias es el llamado *principio antrópico*. Brandon Carter, uno de los científicos que más ha tratado de impulsar este principio, hace notar que la existencia de un observador (o sea nosotros) es sólo posible bajo ciertas combinaciones restringidas de las constantes físicas fundamentales. ¿Por qué de la infinidad de valores posibles, las constantes físicas tienen una tan afortunada selección? El principio antrópico trata de poner las bases filosóficas para estas coincidencias. El mismo Carter lo define de la siguiente manera: «El universo debe ser como es para permitir la aparición de observadores dentro de él en algún momento». Este principio representa una desviación del pensamiento científico clásico. De hecho, en esencia propone que nuestro universo está hecho a la medida para nosotros. La cercanía del principio antrópico a la explicación religiosa del origen del universo (o sea creado por un dios para que lo habite la humanidad) es, para ponerlo moderadamente, irritante para la mayoría de los científicos.

Se ha buscado por lo tanto una explicación que esté más dentro del marco científico para entender las características de nuestro universo. Por ejemplo, se ha propuesto que el universo en el pasado se ha expandido y contraído infinitas veces. En cada «rebote» las constantes físicas fundamentales podrían cambiar. En la inmensa mayoría de las veces, estas constantes no permitirían la aparición de la vida y por lo tanto no había observadores que pudiesen sacar conclusiones sobre el universo. Sin embargo, en algunas ocasiones, las constantes físicas se combinarían afortunadamente, aparecería la vida inteligente y por lo tanto observadores. Desde luego, estos observadores se maravillarían de las extrañas coincidencias de «su» universo, que permitieron la aparición de ellos.

Alternativamente, hay quien piensa que pueden existir simultáneamente una infinidad de universos que no se comunican entre sí. En la mayoría de estos universos no se darían las combinaciones correctas de las constantes físicas y no habría impertinentes observadores que estudiaran las características de esos universos. De nuevo, en aquellos en que hubiera observadores, éstos concluirían que su universo fue hecho a la medida para ellos.

De cualquier manera, es muy notable que la ciencia haya permitido determinar que la física de nuestro universo es tal que resulta propicia para la vida, al menos como la conocemos y aceptamos nosotros. Sin embargo, las razones (si es que las hay) de estas coincidencias aún no se comprenden.

XV
Algunos descubrimientos recientes

La astronomía no se ha quedado estacionaria en su acervo de conocimientos. Todo lo contrario, año con año, se hacen nuevos descubrimientos que amplían nuestra concepción del universo. En este capítulo describimos someramente algunos de los resultados recientes de mayor relevancia.

1) Los hoyos negros sí tienen emisiones

Uno de los conceptos teóricos más importantes de nuestro tiempo es el de los hoyos negros. La teoría de la relatividad general predice que si compactamos la masa de un objeto más y más, con el tiempo alcanzaremos un radio para el cual la atracción gravitacional en la superficie del objeto es tan grande que ni aun la luz podría escapar de ellos. Para un objeto con la masa de la Tierra este radio crítico (llamado radio de Schwarzchild) es de sólo 0.9 cm. Como es imposible para la tecnología actual el crear un hoyo negro en el laboratorio, se les ha tratado de detectar en distintas partes del cosmos, donde cierto tipo de fenómenos que involucran energías astronómicas podrían crear hoyos negros. Por ejemplo, se cree que las explosiones estelares llamadas supernovas podrían comprimir la parte central de una estrella hasta formar un hoyo negro.

¿Han finalmente detectado los astrónomos un hoyo negro más allá de toda duda? Esta es una pregunta muy difícil de contestar. Existen observaciones de ciertas regiones del universo en donde se cree que existen hoyos negros, pero la evidencia no es concluyente aún. Como hemos dicho, se creía hasta hace poco que los hoyos negros no emitían ningún tipo de radiación y por lo tanto habría que probar su existencia indirectamente por los efectos de atracción gravitacional que producirían sobre estrellas o nubes gaseosas que estuviesen cerca de ellos. El sistema estelar binario con emisión de rayos X llamado Cisne X, es uno de los mejores candidatos, pues se cree que uno de los dos objetos que lo forman es un hoyo negro con una masa varias veces mayor que la de nuestro Sol.

También se cree que el centro de nuestra galaxia alberga un hoyo negro supermasivo, con millones de veces la masa del Sol. Esto se ha deducido a partir de las grandes velocidades de rotación de las nubes gaseosas que existen a su alrededor. Se ha propuesto también que un hoyo negro aún más masivo, con miles de millones de veces la masa del Sol, existe en el centro de la galaxia eruptiva M 87. Existen muchas galaxias que al ser observadas en las frecuencias de radio muestran chorros de plasma que son eyectados desde su núcleo. La causa de esta actividad también ha sido atribuida a un hoyo negro supermasivo. Todas estas evidencias son indirectas

puesto que el hoyo negro, en caso de existir, no posee (se decía) emisión característica alguna.

En 1974 y para sorpresa general, el físico inglés S. W. Hawking demostró en una serie de trabajos ya clásicos, que en realidad los hoyos negros sí tienen una emisión característica. Su resultado se basa en la aplicación de la mecánica cuántica a las predicciones de la relatividad general. Cuando aquélla no se toma en cuenta, las partículas y la radiación no pueden escapar del hoyo negro. Sin embargo, de acuerdo con la mecánica cuántica, en una región en que hay fuerzas tan intensas, la probabilidad de creación de pares de partículas no es despreciable. El fenómeno de creación de pares, predicho por Dirac en 1931 como la producción de un electrón y un positrón a partir de la radiación electromagnética, sin dejar de seguir siendo sorprendente, es un fenómeno muy familiar para los físicos dedicados al estudio de las partículas elementales. Las condiciones en que se encuentra el espacio en la superficie de un hoyo negro favorecen la creación de partículas que originan la emisión característica de este objeto.

¿Podremos en el futuro detectar directamente a los hoyos negros por medio de su emisión de partículas? Al parecer no, porque ella es debilísima y se confunde con la emisión de los muchos otros objetos «normales» que pueblan el universo. Aunque parezca paradójico, las teorías predicen que los hoyos negros que emiten más intensamente son los más pequeños. Mientras más emiten, más masa pierden y más pequeños se hacen. Si durante la gran explosión en la que se originó el universo se crearon hoyos negros de todos los tamaños, es posible predecir que los que originalmente tuvieron una masa de 10^{15} gramos (similar a la masa de un asteroide) son los que estarían emitiendo más intensamente en el presente. De hecho, éste efecto de transformación de masa en energía es catastrófico y el hoyo negro acabaría su vida emitiendo un pulso de rayos gamma. Se han hecho experimentos buscando recibir estos pulsos y hasta ahora no se han detectado.

2) Expansiones superlumínicas en los núcleos de los cuasares

Como sabe todo físico, la velocidad de la luz (300 000 kilómetros por segundo) no puede ser alcanzada, mucho menos excedida, por los cuerpos del mundo real. A principios de la década de los setentas, varios grupos de radioastrónomos comenzaron a estudiar los núcleos de los misteriosos cuasares usando las poderosas técnicas de la interferometría de base muy larga. Esta técnica consiste en el uso simultáneo de varios radiotelescopios distribuidos sobre vastas áreas geográficas, y permite obtener mapas de la emisión de objetos de pequeñísimas dimensiones angulares.

Un resultado muy importante se obtuvo al realizar mapas de un mismo cuasar en distintas épocas y compararlos luego. Los cuasares tienen erupciones en las que su brillo aumenta considerablemente. Se encontró que estas erupciones van

acompañadas de la eyección de dos o más nubes de plasma que se expanden respecto al centro del cuasar. Se encontró que estas nubes se expanden a velocidades que exceden la de la luz, típicamente de 5 a 10 veces.

Pero no hay por qué alarmarse y comenzar a buscar una alternativa a la teoría de la relatividad. Varios ingeniosos astrofísicos han demostrado que estos efectos podrían ser sólo aparentes, o sea una especie de ilusión óptica. Los diversos modelos propuestos involucran efectos de velocidad de fase. Estos efectos son similares a los que ocurren cuando una ola rompe al llegar a la orilla del mar. La formación de espuma se propaga rapidísimo, a velocidades mucho mayores que la de la ola en sí. Pero, por otra parte, ninguno de los varios modelos ha sido aceptado por la generalidad de los astrónomos y estas expansiones aparentemente superlumínicas siguen siendo uno de los misterios más importantes de la astronomía contemporánea.

3) Moléculas complejas en el espacio interestelar

Los vastos espacios que existen entre las estrellas no se encuentran totalmente vacíos sino que los llena un tenue gas interestelar. Este gas se halla a su vez permeado por energéticas radiaciones ultravioletas capaces de destruir los lazos químicos de las moléculas. Se creía pues que sólo los resistentes átomos podrían subsistir en un medio tan inhóspito. Sin embargo, los setentas presenciaron el descubrimiento de complejas y delicadas moléculas en las llamadas nubes moleculares. El gas interestelar es muy inhomogéneo y se conglomera en nubes de años luz de diámetro que por sus condiciones físicas son un criadero de moléculas complejas. Las partes centrales de estas grandes nubes moleculares se hallan escudadas de la destructiva radiación ultravioleta por el material de su periferia. En los núcleos de estas nubes se han descubierto más de 50 moléculas, algunas muy pesadas como el cianodiacetileno (HC_5N). Es muy sugerente el que sea también en estas nubes moleculares donde se forman las nuevas estrellas, algunas de las cuales muy posiblemente tendrán planetas en los que quizá aparezca la forma más compleja de la organización de la materia: la vida. Parecería que la naturaleza se organiza en secuencias de mayor complejidad al ir del sencillo medio interestelar a las nubes moleculares y finalmente a estrellas y planetas.

4) Vulcanismo activo en Ío

Nuestro conocimiento de los planetas y satélites que forman el sistema planetario del Sol se ha visto grandemente acrecentado con los datos proporcionados por las sondas espaciales enviadas por los Estados Unidos y la Unión Soviética. Particularmente impactante fue el descubrimiento hecho en marzo de 1979 por el vehículo espacial Viajero 1 de la existencia de volcanes activos en Ío, uno de los

satélites de Júpiter. Cuatro meses después un segundo vehículo, Viajero II, estudió este fenómeno en más detalle. De los catorce satélites que se le conocen a Júpiter, probablemente sea Ío, el de características más peculiares. Hace quince años se descubrió que las emisiones a longitudes decamétricas de radio que Júpiter emite esporádicamente ocurrían, en general, cuando Ío se encontraba formando un ángulo recto respecto a la línea Tierra-Júpiter. Generalmente se cree que estas emisiones se deben a que lo perturba a la magnetosfera de Júpiter (en la que Ío se encuentra embebido) y que esto crea inestabilidades eléctricas que a su vez originan radiación de radio. Las emisiones son más fuertes en direcciones paralelas al movimiento de Ío y esta característica geométrica hace que se les detecte más comúnmente cuando Ío se halla formando un ángulo recto respecto a Júpiter, o sea cuando su movimiento orbital es paralelo a la línea de visión de la Tierra a Júpiter.

El descubrimiento de vulcanismo activo indica que, además de la Tierra, existen otros cuerpos en el Sistema Solar que tienen una superficie dinámica y cambiante. La atmósfera terrestre, con sus procesos asociados como la erosión y la sedimentación, da a la Tierra un tratamiento facial que mantiene su superficie aparentemente joven, puesto que paulatinamente hace desaparecer a los cráteres meteoríticos antiguos. Algo similar debe ocurrir en Ío, puesto que las fotos de los Viajeros I y II no muestran ningún cráter del tipo meteorítico. Esto implica que la superficie de Ío cambia y se rejuvenece en periodos del orden de sólo millones de años. En contraste, Ganimedes, otro de los satélites de Júpiter, debe de tener una superficie prácticamente estática puesto que se halla cubierto de cráteres creados por impactos meteoríticos.

5) ¿Se formó nuestro Sistema Solar debido a la explosión de una supernova?

Se cree que cuando se formó nuestro universo hace 15 mil millones de años, casi toda la materia se hallaba en la forma de los elementos hidrógeno y helio. Así, cuando se formaron las galaxias y en ellas las primeras estrellas, no había condiciones para la aparición de la vida porque ésta requiere de muchos otros elementos químicos como carbón, nitrógeno, oxígeno, etc. Afortunadamente, las estrellas más masivas de aquella primera generación de estrellas debieron haber terminado su vida en una explosión de supernova. El gas eyectado en esta explosión es muy importante puesto que es muy rico en los elementos químicos necesarios para la formación de planetas de tipo terrestre (silicio, aluminio, hierro, etc.), así como para la aparición de la vida (carbono, nitrógeno, oxígeno, etc.). Este gas se mezcla con el gas interestelar, de modo que para cuando se formaron nuevas estrellas ya existían las condiciones para que se formasen planetas terrestres y quizá vida. Es por esto que siempre se ha creído que las supernovas estaban relacionadas indirectamente con la formación de nuevos sistemas solares.

Recientemente, análisis químicos del meteorito Allende sugieren que esta relación entre supernovas y sistemas solares es mucho más estrecha de lo creído. El famoso meteorito Allende es llamado así porque cayó en 1969 cerca del pueblito de Allende, Chihuahua. En él se ha detectado un exceso del isótopo magnesio 26 que sólo se puede explicar proponiendo que cuando el meteorito se solidificó tenía aluminio 26 entre sus componentes. Lo importante de esto es que el aluminio 26 es un isótopo con una vida media relativamente corta (700 000 años) que decae hasta formar el magnesio 26. La presencia de un exceso de magnesio 26 en el meteorito Allende implica que hubo una explosión de supernova que inyectó elementos químicos en una nube de gas interestelar y que antes de que el aluminio 26 decayera se solidificó en los meteoritos. Inclusive se ha propuesto que fue precisamente esta explosión de supernova la que causó que un fragmento de nube gaseosa se colapsara para formar el Sistema Solar. En otras partes de nuestra galaxia se ha encontrado evidencia de que cuando el gas eyectado por una supernova choca con nubes de gas interestelar, este gas es comprimido y en ciertos casos quizá se ha colapsado gravitacionalmente formando nuevas estrellas. Si esta teoría es correcta, concluiríamos que la muerte de las viejas estrellas causa el nacimiento de otras nuevas.

6) Flujos bipolares en regiones de formación estelar

En 1980 dos grupos de radioastrónomos detectaron, durante sus estudios de regiones de formación estelar, un nuevo tipo de fenómeno inesperado. Uno de los grupos estaba encabezado por Ronald Snell de la Universidad de Texas y el otro por mí, que ya entonces laboraba para el Instituto de Astronomía de la UNAM. El fenómeno consiste en lo siguiente. Alrededor de las estrellas jóvenes se detectan dos nubes de gas que se alejan de la estrella en forma antiparalela. A este fenómeno se le bautizó, por su geometría, como un flujo bipolar. En la actualidad se conocen unos 50 casos de flujos bipolares.

¿Por qué son importantes los flujos bipolares? A primera aproximación, uno espera que cualquier material eyectado por una estrella salga en todas las direcciones, o sea con una geometría isotrópica. ¿Por qué los flujos bipolares sólo se alejan de la estrella en dos direcciones? La respuesta tentativa que se ha dado a esta pregunta es que alrededor de las estrellas jóvenes existe un disco de gas que detiene a las eyecciones de la estrella en su plano. Las eyecciones sólo pueden salir por los polos del disco, formándose un flujo bipolar.

La posible existencia de un disco alrededor de las estrellas jóvenes es importante porque se cree que esta situación ocurrió para nuestro Sol poco después de su formación. Este disco hipotético es muy interesante porque de él se podrían formar posteriormente los planetas. Con el avance en la capacidad de la instrumentación

astronómica ha sido ya posible confirmar que existen discos alrededor de al menos algunas estrellas jóvenes. La especulación es que en el futuro se formarán planetas a partir de estos discos. Todavía no se ha podido detectar de manera definitiva un planeta en otra estrella, pero estos discos bien podrían constituir las estructuras precursoras de los planetas.

7) La estructura del universo

Uno de los postulados fundamentales de la astronomía es que el universo es homogéneo. Por esto, entendemos que si tomamos un volumen de espacio lo suficientemente grande, vemos más o menos lo mismo independientemente de donde estemos colocados. En el Centro de Astrofísica de la Universidad de Harvard y el Instituto Smithsoniano se ha trabajado intensivamente para determinar cómo están distribuidas en el espacio las galaxias. Para esto, primero se determina la posición de la galaxia en el cielo, o sea en dos dimensiones. Luego se mide la velocidad de alejamiento de la galaxia en cuestión y, usando la ley de Hubble, se determina la distancia a la galaxia, o sea su tercera dimensión. Con estos datos es posible construir una maqueta tridimensional del universo. El primer resultado que se obtiene es conocido hace muchos años; las galaxias están agrupadas en cúmulos. El nuevo resultado que obtuvieron los investigadores del Centro de Astrofísica fue sorprendente y aún no tiene explicación. Resulta que los cúmulos de galaxias no están distribuidos al azar en el espacio, sino que forman enormes filamentos, de dimensiones demasiado grandes para ser explicadas por cualquiera de las teorías disponibles. Se cree que estos filamentos son consecuencia de las condiciones físicas que existieron en el universo joven. Pero la explicación precisa de su existencia no ha sido encontrada aún.

XVI
Tres enigmas de la astronomía contemporánea

No queremos terminar dejando al lector con la impresión de que el conocimiento astronómico actual es como un edificio terminado. La ciencia en general, y la astronomía en particular, son (o al menos parecen ser) una búsqueda interminable. Cada nuevo descubrimiento produce nuevas preguntas y problemas. Esto no quiere decir que vayamos hacia atrás, porque cada vez el conocimiento acumulado es mayor, sino que la diversidad de la naturaleza es muy grande.

Así, la astronomía ha enfrentado enigmas en todos los tiempos. Hace cientos de años los astrónomos debatían si el Sol giraba alrededor de la Tierra o la Tierra alrededor del Sol. Durante el siglo pasado comenzó a hacerse la espectroscopia de los objetos cósmicos. Estos estudios revelaban que algunas nebulosas tenían rayas espectrales que no correspondían a las que emiten los elementos químicos que conocemos en la Tierra. Se especuló que existían elementos como el nebulio y el coronio, que se producirían solamente en otras regiones del universo. El avance en nuestros conocimientos de física atómica aclaró la situación. Las rayas espectrales provienen de los mismos átomos que existen en la Tierra (y en todo el universo), pero éstos tienen condiciones de excitación muy especiales (bajas densidades y altas temperaturas) que no se pueden reproducir en los laboratorios terrestres. Así, el nebulio resultó ser el familiar oxígeno y el coronio una forma altamente ionizada del hierro.

A principios de nuestro siglo parecía no haber explicación para las grandes cantidades de energía que producen las estrellas. ¿Cómo podían éstas persistir por miles de millones de años sin consumirse? Los mecanismos de combustión que se conocían entonces implicaban que el Sol debería de haberse apagado hace mucho y sin embargo estaba ahí brillando, ajeno a las conclusiones de los distinguidos científicos de la época. La solución sólo se encontró cuando se descubrió la enorme eficiencia de los procesos de energía nuclear. Las estrellas sacan su energía de la fusión termonuclear y no de la combustión clásica, que es muy poco eficiente.

Muchos de los problemas de épocas anteriores se han resuelto, pero su lugar ha sido ocupado por otros. En este capítulo describiremos tres enigmas de la astrofísica contemporánea. La comunidad científica mundial los deberá de resolver en las décadas venideras.

1) ¿Cómo se forman las estrellas?

El dogma central de la formación estelar es que las estrellas se forman mediante la contracción gravitacional de nubes que existen en el medio interestelar. Existen

muchas evidencias *indirectas* que favorecen este punto de vista. Por ejemplo, las estrellas jóvenes están siempre embebidas o muy cerca de las nubes interestelares. Sin embargo, la demostración definitiva de que la contracción gravitacional es el mecanismo que forma a las estrellas sería el observar a un fragmento de nube contrayéndose. Aun cuando se han realizado muchos experimentos encaminados a detectar esta etapa, todos han sido infructuosos. Siempre se observa *expansión* y no contracción en los alrededores de las estrellas jóvenes. Esto ha llevado al astrofísico soviético Viktor Ambartsumian a especular que las estrellas se originan, no de una contracción, sino de la expansión de embriones de materia superdensa que quedaron como remanentes de la gran explosión.

El punto de vista ortodoxo argumenta, justificadamente, que la etapa de contracción es muy difícil de detectar puesto que ocurre de una manera poco conspicua. Los fenómenos de expansión que se detectan frecuentemente corresponden a etapas posteriores, cuando la estrella ya está formada. Los nuevos radiotelescopios para la observación de ondas de radio milimétricas que se han instalado en Japón y en España tienen la capacidad de detectar por primera vez la etapa de contracción gravitacional. Es pues muy probable que este «eslabón perdido» de la evolución estelar sea observado por primera vez en los próximos años. ¿Pero qué sucederá si no ocurre esta detección? Tendremos que replantearnos todo el problema de la formación estelar. Después de todo, las especulaciones de Ambartsumian podrían ser correctas.

2) ¿Cuál es la fuente de energía de los núcleos de las galaxias activas y los cuasares?

Así como a principios de nuestro siglo los astrónomos no podían explicar cómo se las arreglaban las estrellas para producir tanta energía, ahora enfrentamos un problema similar pero de mucha mayor magnitud. Los núcleos de algunas galaxias (llamadas activas) y los cuasares generan potencias extraordinarias, llegando en ciertos casos a billones de veces las que genera el Sol. El problema no puede explicarse proponiendo simplemente que ahí residen un billón de estrellas porque los espectros de los núcleos de las galaxias activas y los cuasares son muy diferentes a los de las estrellas. Más aún, las regiones involucradas son relativamente pequeñas y sería imposible empacar ahí un billón de estrellas.

Ante estas dificultades se cree que es necesario pensar en una «máquina» cósmica radicalmente distinta a las que conocemos (estrellas, explosiones de supernova, etc.). El modelo más favorecido involucra a un hoyo negro muy masivo (con cientos de millones de masas solares) a cuyo alrededor gira un disco de gas. Al rotar alrededor del hoyo negro, el gas se calienta a muy altas temperaturas y emite energía en cantidades copiosas antes de ser tragado. Sin embargo, aún no se ha podido ratificar

observacionalmente este modelo. Los hoyos negros se han propuesto para explicar una gran variedad de fenómenos porque son muy eficientes en transformar energía gravitacional en radiación. Pero aun su existencia es especulativa. Los nuevos telescopios incluyen siempre en sus programas experimentos que buscan ahondar en el problema de la existencia de los hoyos negros. También esperamos avances fundamentales en la solución de este enigma antes del año 2000.

3) ¿Por qué existe materia en el universo?

La mayoría de los astrónomos está de acuerdo en que el universo tuvo su origen en la gran explosión. Cuando el universo era extremadamente joven y caliente debió, por argumentos de simetría, de haber igual cantidad de partículas y antipartículas. Si no tomamos en cuenta algún proceso de simetría, con el paso del tiempo la materia y la antimateria se hubieran aniquilado mutuamente y ahora sólo habría radiación y nada de materia (o de antimateria). Pero sabemos que el universo es de materia. Se ha propuesto que durante aquellos momentos brevísimos existieron procesos asimétricos que permitieron se estableciera un ligero desbalance en las cantidades de materia y antimateria (digamos que había, por cada billón de antipartículas, un billón un partículas). Esto explicaría que, concluida la aniquilación, quedara algo de materia. Los procesos que causaron esta afortunada asimetría siguen actuando hoy, pero de una manera muy poco frecuente. De hecho, su extrapolación a la actualidad lleva a una predicción perturbadora: el protón, uno de los bloques básicos de la materia, no debe existir infinitamente. Estas teorías proponen que debe tener una vida media de 10^{31} años antes de desintegrarse en otras partículas. Uno puede diseñar un experimento para poner a prueba este concepto con dos acercamientos extremos: observar un protón por 10^{31} años u observar 10^{31} protones durante un año. Obviamente, es el segundo enfoque el que se ha seguido y varios grupos monitorean con detectores especiales grandes masas de agua, hierro y otros materiales. Existe gran controversia sobre los resultados preliminares, con algunos grupos reportando que algunos protones se han desintegrado y otros diciendo que no. Si la desintegración del protón se comprueba tendremos una explicación para la existencia de la materia en el universo. Pero también tendremos que cambiar nuestros esquemas para el futuro del universo, en los que se supone que el protón perdura infinitamente.

Apéndice
La aportación mexicana a la astronomía

Durante el desarrollo de este libro he procurado mencionar el menor número posible de nombres. Es bien sabido que las aportaciones científicas resultan del esfuerzo de muchas personas pero que las circunstancias hacen que parezcan producto de una sola mente. Aun cuando no figura entre esta reducida cantidad de personajes ningún mexicano, sí quisiera aclarar que ha habido y hay un considerable número de astrónomos mexicanos que han hecho contribuciones fundamentales a la astronomía universal. Al respecto, y en toda justicia, debería uno comenzar reseñando los conocimientos astronómicos que alcanzaron varios pueblos mesoamericanos, en particular los mayas. Reconstruir con precisión dichos conocimientos astronómicos es tarea casi imposible, pero existen una serie de elementos en los que la mayoría de los arqueoastrónomos están de acuerdo. El solo hecho de que estos pueblos hayan tenido agriculturas productivas implica la formulación de un calendario que les sirviera para planificar las épocas de quema y de siembra. La manera más directa de llevar la cuenta del paso del año en países en los que no hay estaciones bien marcadas (como un invierno nevado), es mediante la observación astronómica. La mayor parte de las constelaciones sólo son visibles en ciertas épocas del año. Por ejemplo, la de Orión puede verse durante el invierno y la del Escorpión durante el verano. Reconocer a estas constelaciones en el cielo nos permite ubicarnos, aunque de manera poco refinada, en el tiempo.

También el Sol sale y se pone en diferentes puntos del horizonte de acuerdo con la época del año. El Sol alcanza su máxima posición sureña el 22 de diciembre, en el solsticio de invierno, y su máxima posición de salida norteña el 22 de junio, en el solsticio de verano. El 21 de marzo y el 23 de septiembre el Sol sale exactamente al este, fecha de los equinoccios de primavera y otoño, respectivamente (véase la Fig. 37). Llevar un registro de la posición de salida (o puesta) del Sol permite saber la fecha. Por ejemplo, la orientación definida por dos estelas podría fijar una fecha de importancia religiosa o agrícola. En Copán, Honduras, el Sol sale el 12 de abril en el punto del horizonte definido por dos estelas que están separadas 7 km. Se cree que esta fecha señala el inicio del ciclo de agricultura de milpa.

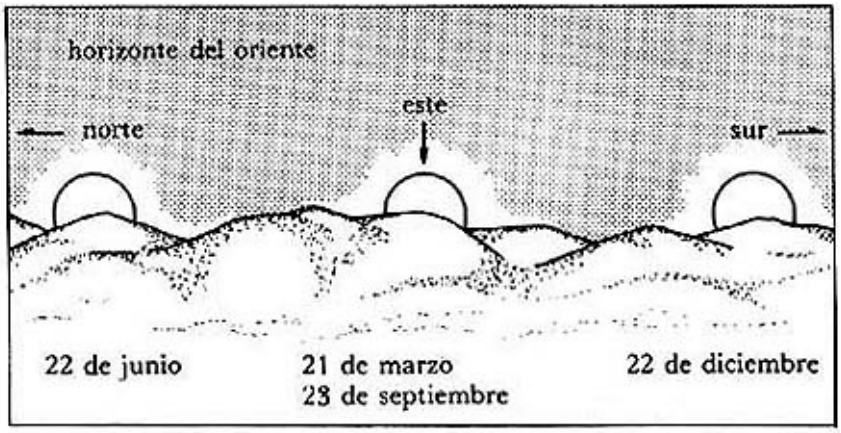


Figura 37. El Sol sale en distintos puntos del horizonte de acuerdo con el día del año.

Una manera más refinada de registrar los puntos importantes del horizonte sería construyendo edificios que funcionaran como marcadores, que ofrecieran mediante la orientación de sus muros y aberturas, direcciones de importancia astronómica. En esta categoría están el edificio J de Monte Albán, Oaxaca y el Caracol de Chichén ltzá, Yucatán. Este último edificio es particularmente interesante. Un estudio hecho por el arqueoastrónomo Anthony Aveni y sus colaboradores demostró que, del total de las 29 alineaciones arquitectónicas que se obtienen del Caracol, 20 tienen una posible significación astronómica. Entre ellas están dados los puntos del horizonte de la puesta y salida del Sol en el solsticio de verano, el punto de puesta del Sol en los equinoccios, y el sur astronómico. También están registrados los puntos de ocaso del planeta Venus en sus posiciones máximas norteña y sureña. Este planeta era de gran importancia para los mayas, puesto que lo consideraban una de las representaciones del dios Kukulkán.

Los pocos códices prehispánicos existentes también indican investigaciones astronómicas. Una parte del *Códice Dresde* hace un recuento detallado de las observaciones del planeta Venus. El interés astronómico de los pueblos prehispánicos, como el de todos los pueblos antiguos, estaba dominado por un componente magicorreligioso que lo aleja de la concepción moderna de la ciencia.

Desafortunadamente, la Conquista truncó el avance de las culturas indígenas e hizo que los conocimientos astronómicos se perdieran casi en su totalidad. La investigación astronómica en México durante la Colonia ha sido poco estudiada. La hicieron particulares, pues no existía ninguna institución oficial donde se realizasen los estudios del cielo. Entre los esfuerzos destacados de la época colonial cabe mencionar la *Libra astronómica y philosófica* de don Carlos de Sigüenza y Góngora, publicada en el siglo XVII.

Siendo presidente de la República Porfirio Díaz, se creó por decreto el Observatorio Astronómico Nacional el 18 de diciembre de 1876; después de mucho tiempo México contó con una institución dedicada al estudio profesional de la

astronomía. El primer Observatorio Astronómico Nacional entró en funciones el 5 de mayo de 1878. Se hallaba instalado en la azotea del castillo de Chapultepec (véase la Fig. 38). El fundador y primer director del observatorio fue el ingeniero Ángel Anguiano. En 1882 el observatorio se trasladó a la Villa de Tacubaya, distante 8 km del centro de la ciudad de México, donde se empezó a construir un edificio adecuado que no fue terminado sino hasta 1908.

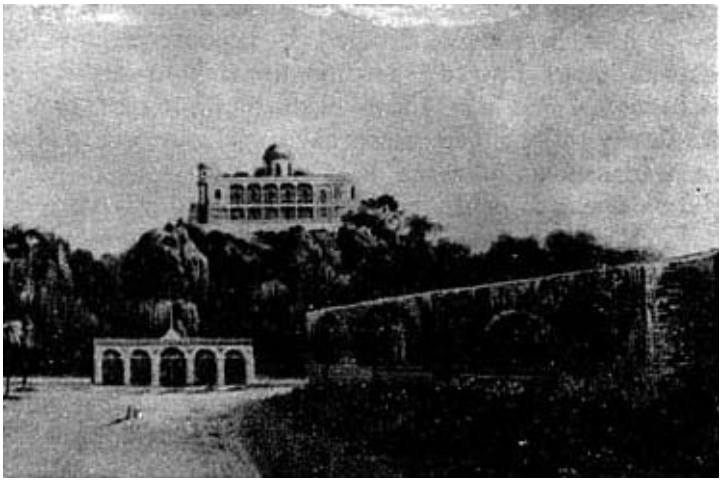


Figura 38. El Observatorio Astrónomico Nacional estuvo originalmente instalado en el techo del castillo de Chapultepec.

El observatorio realizaba estudios de la actividad solar; de los eclipses, de los asteroides y de las estrellas, además de hacer observaciones meteorológicas y magnéticas. En 1881 se comienza a publicar el *Anuario del Observatorio Astronómico Nacional* publicación que ha aparecido ininterrumpidamente hasta nuestros días.

Gracias a una fotografía excelente de la Luna, el Observatorio Astronómico Nacional fue invitado en 1887 a participar, con otras 17 instituciones internacionales, en la elaboración de un catálogo que cubriría todo el cielo. Durante las siguientes décadas, ésta fue la principal ocupación del Observatorio. En 1901 se fundó la Sociedad Astronómica de México que agrupa a los astrónomos aficionados del país, personas que se dedican a diversas profesiones pero que ocupan sus horas libres observando los astros. En la actualidad, la Sociedad tiene en desarrollo un magnífico observatorio situado cerca de Chapa de Mota, estado de México.

Los años posteriores a la Revolución fueron particularmente duros para el observatorio debido a la depresión económica y a la inestabilidad política. En 1929 el Observatorio Astronómico Nacional es puesto bajo la jurisdicción de la Universidad Nacional Autónoma de México. Sin embargo, tanto el país como el mundo atravesaban épocas económicas muy difíciles, y no fue sino hasta la década de los cuarenta cuando la astronomía mexicana comienza a tomar vuelo. Durante la dura época de 1914 a 1946 el director del Observatorio Astronómico Nacional fue el

ingeniero Joaquín Gallo quien, luchando contra muchas dificultades, consiguió que la institución sobreviviera.

La época moderna de la astronomía mexicana comienza en 1942, cuando se inaugura en un cerro cercano al pueblo de Tonantzintla, Puebla, un moderno observatorio astrofísico, dependiente de la Secretaría de Educación Pública. Detrás del inmenso logro que significó conseguir los medios económicos para construirlo se hallaba el empeño del extraordinario diplomático y astrónomo Luis Enrique Erro. Con actitud visionaria, Erro logró que las más altas autoridades del país apoyaran el desarrollo del nuevo observatorio. Por su impulso a la astronomía nacional, Erro recibió después de su muerte la distinción de que uno de los cráteres de la cara oculta de la Luna fuese bautizado con su nombre (véase la Fig. 39). También el planetario del Instituto Politécnico Nacional lleva el nombre de Luis Enrique Erro.

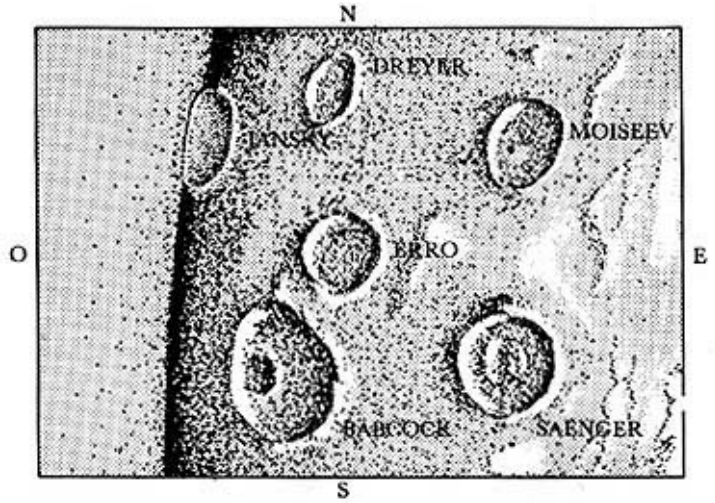


Figura 39. Uno de los cráteres de la cara oculta de la Luna lleva el nombre de Luis Enrique Erro. Entre otros, en su cercanía están los cráteres dedicados a Jansky, el padre de la radioastronomía, y a Babcock, el inventor del magnetógrafo solar.

Entre el moderno equipo del nuevo Observatorio de Tonantzintla se hallaba un tipo especial de telescopio llamado de Cámara Schmidt, que permite fotografiar grandes regiones del cielo y es ideal para estudiar un crecido número de objetos celestes a la vez. En el momento en que empezó a dar sus primeros resultados astronómicos, en 1948, el telescopio tipo Schmidt de Tonantzintla era el más grande del mundo en su género. El doctor Guillermo Haro, director entonces del Observatorio Astronómico Nacional, y sus colaboradores, supieron hacer excelente uso de este instrumento. En los años cincuenta descubrieron una nueva clase de objetos cósmicos, ahora conocidos como objetos Herbig Haro. Estos objetos son nubecillas brillantes que al parecer carecen de fuente propia de energía y cuya naturaleza continúa siendo tema de debate en el mundo astronómico. Haro también descubrió y estudió un tipo de galaxias de color azul y con fuertes líneas de emisión que son conocidas en la bibliografía astronómica como galaxias Haro. Desde

Tonantzintla se realizaron también importantes estudios sobre las estrellas ráfaga, estrellas de masa reducida que sufren aumentos repentinos en su brillo. También tuvo un papel preponderante en el desarrollo de la astrofísica mexicana la doctora Paris Pismis de origen armenio pero radicada en México desde la década de los cuarenta. No sólo realizó trabajos teóricos y de observación, sino que impulsó la enseñanza de la astronomía a las nuevas generaciones: casi todos los astrónomos mexicanos actuales fueron, en algún momento, sus alumnos.

La astronomía teórica mexicana ha tenido también destacados exponentes, entre ellos sobresale el doctor Arcadio Poveda, director del Instituto de Astronomía de la UNAM de 1968 a 1980. Son muchas las contribuciones de Poveda a la astrofísica teórica, pero ha tenido particular repercusión un método para determinar la masa de los cúmulos globulares y de las galaxias elípticas (que es conocido mundialmente como el método Poveda) y sus estudios sobre el brillo superficial de las supernovas. Otro logro de Poveda fue predecir teóricamente que las estrellas jóvenes deberían estar aún rodeadas por los residuos de la nube en que se formaron. Estos residuos, predijo Poveda, deberían ser calentados por la joven estrella y emitir, en consecuencia, abundante radiación infrarroja. En un experimento de observación clásico otro astrónomo mexicano, el doctor Eugenio Mendoza, observó en 1968 esta radiación infrarroja proveniente de los alrededores de varias estrellas jóvenes. Ambas investigaciones se produjeron en la década de los sesenta.

Más recientemente aún, son dignas de destacarse las determinaciones sobre las abundancias químicas en el universo hechas por los doctores Manuel Peimbert y Silvia Torres Peimbert. Estos estudios han sido punto de partida para otros trabajos realizados por astrónomos de muchos países del mundo. Actualmente, el centro astronómico más grande de México es el Instituto de Astronomía de la UNAM donde laboran alrededor de treinta investigadores apoyados en su trabajo por un número similar de técnicos. Varios investigadores tienen ya amplio reconocimiento internacional. Entre los temas que se estudian a profundidad en México se hallan las estrellas variables, el medio interestelar, las supernovas, los sistemas estelares múltiples y la formación de las estrellas, temas que se abordan tanto mediante la observación como teóricamente.

La astronomía mexicana se ha involucrado en los últimos años en la búsqueda de nuevos sitios astronómicos puesto que el crecimiento de la ciudad de Puebla ha hecho que el cielo nocturno de Tonantzintla sea demasiado brillante, impidiendo el estudio de objetos astronómicos débiles. En este momento, el nuevo Observatorio Nacional del Instituto de Astronomía de la UNAM se encuentra en las montañas de San Pedro Mártir en Baja California Norte. Existen, ya ahí en funcionamiento tres excelentes telescopios, entre los que destaca el telescopio de espejo de 2.1 m. que fue puesto en funcionamiento recientemente (véase la Fig. 40). Este telescopio es el más grande

propiedad de un país iberoamericano, fue diseñado y construido en parte por personal del Instituto de Astronomía de la UNAM dirigido por el ingeniero José de la Herrán. Otro nuevo sitio en desarrollo es el Observatorio del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, que se halla cerca de Cananea, Sonora. Estos dos espléndidos sitios permitirán el desarrollo futuro de nuestra astronomía. En particular, el Observatorio de San Pedro Mártir, muy alejado de cualquier asentamiento humano, garantiza un cielo límpido para muchas generaciones futuras de astrónomos mexicanos.

Figura 40. Vista exterior del edificio del telescopio con espejo de 2.1 m de diámetro del Instituto de Astronomía de la UNAM. El telescopio se halla en el nuevo Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California Norte.

Como hemos comentado, la astronomía moderna se realiza no solamente observando la radiación visible (luz) que emiten los astros, sino también sus radiaciones de radio, infrarrojas, ultravioletas, de rayos X y de rayos gamma. Aun cuando este tipo de observación astronómica requiere de instrumentos muy complejos y costosos, tarde o temprano tendremos que enfrentar el reto de construirlos en México. Y como la astronomía es una ciencia sumamente competitiva, mientras más pronto se haga, mejor. Ya un número apreciable de astrónomos mexicanos ha realizado importantes experimentos en el campo de las radiaciones no visibles utilizando instrumentos de otros países, especialmente radiotelescopios y satélites que captan radiaciones ultravioleta. Con los magníficos antecedentes de la astronomía mexicana en el campo de la radiación visible, no dudo que habrá desempeños igualmente brillantes en el estudio de las otras longitudes de onda.

Contraportada

Luis F. Rodríguez J. nació en Mérida, Yucatán. Estudió la licenciatura de física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Hizo el doctorado en astronomía en la Universidad de Harvard, EUA. En su tesis doctoral presentó evidencia observacional en favor de la existencia de un hoyo negro supermasivo en el núcleo de nuestra galaxia. En 1980 obtuvo el premio Robert J. Trumpler de la Astronomical Society of the Pacific, el cual se otorga anualmente a la mejor tesis doctoral de astronomía. Ese mismo año fue designado director del Instituto de Astronomía de la UNAM. Se le han otorgado otros premios internacionales importantes.

El trabajo de investigación del Dr. Rodríguez ha dado aportaciones particularmente importantes en el área de la formación estelar, descubrimiento del fenómeno de los flujos bipolares, la elucidación de la naturaleza de la fuente de energía de los objetos Herbig-Haro y la demostración observacional de la existencia de discos alrededor de las estrellas jóvenes. Este último resultado es particularmente importante pues implica que la formación de planetas es un fenómeno que ocurre en otras estrellas y no sólo en nuestro Sol. También cuenta con una destacada labor en la divulgación de la ciencia.

Un universo en expansión presenta en forma clara y amena una introducción general al mundo de la astronomía, haciendo hincapié en los nuevos e inquietantes descubrimientos y avances en este campo que, de un mundo ordenado, como se creía no hace mucho que era, se ha vuelto aún más extraño de lo que suponemos.